



TESIS

ANALISA PENGARUH KECEPATAN *FORCED COOLING* TERHADAP MIKROSTRUKTUR, KEKUATAN TARIK DAN KEKERASAN TUBE SUPERHEATER *PULVERIZED COAL BOILER*

**ANDRI
2116207724**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. SUTIKNO, ST.MT**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN ENERGI
KERJASAMA PT. PJB
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



THESIS

**ANALYSIS THE EFFECT OF FORCED COOLING
RATE ON MICROSTRUCTURE, TENSILE
STRENGTH AND HARDNESS OF SUPERHEATER
TUBE IN PULVERIZED COAL BOILER**

**ANDRI
2116207724**

**SUPERVISOR
Dr. Eng. SUTIKNO, ST.MT**

**MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENERGY MANAGEMENT
IN COOPERATION WITH PT. PJB
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Andri

NRP:2116207724

Tanggal Ujian : 20 Juli 2018

Periode Wisuda : September 2018

Disetujui Oleh:


1. Dr. Eng. Sutikno, ST. MT,
NRP : 197407032000031001

(Pembimbing)

2. Suwarno, ST, MSc. Ph.D
NRP : 198005202005011003

(Penguji)


3. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST. M.Eng. Sc.
NRP : 197805102001121001


(Penguji)


4. Dr. Arif Wahjudi, ST. MT. Ph D.
NRP : 197303222001121001

(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri




Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., M.T.

NRP : 196905071995121001

ANALISA KECEPATAN *FORCED COOLING* TERHADAP MIKROSTRUKTUR, KEKUATAN TARIK, DAN KEKERASAN TUBE SUPERHEATER *PULVERIZED COAL BOILER*

Mahasiswa Nama : Andri
Mahasiswa ID : 2116207724
Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno,ST.MT

ABSTRAK

Durasi *down time* untuk *outage* terencana maupun tidak terencana berpotensi menurunkan tingkat *availability* pembangkitan. Oleh karena itu durasi *down time* diharapkan dilakukan dalam waktu sesingkat mungkin. Berdasarkan data *Pareto Loss Output* pada PLTU FTP-1 tahun 2016 dan 2017 menunjukkan kebocoran boiler masih menjadi sepuluh besar gangguan yang sering terjadi. Proses pendinginan dalam rangkaian kegiatan perbaikan boiler memegang peranan penting terkait durasi *down time*. Selain *natural cooling* salah satu upaya menurunkan *down time* adalah dengan melakukan pendinginan *forced cooling* boiler.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh *forced cooling* terhadap struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan dari material superheater. Penelitian ini dimulai dengan melakukan permodelan 3D dan simulasi pendinginan boiler menggunakan *software CFD*. Dari hasil simulasi didapatkan laju penurunan temperatur *tube superheater*. Kemudian dilanjutkan dengan eksperimen pemanasan material tube superheater T91 pada *Ash furnace* laboratorium sampai dengan suhu 540 °C dan didinginkan sesuai dengan laju penurunan temperatur hasil simulasi *software CFD* pada *ash furnace* laboratorium dengan temperatur terkontrol. Pengujian yang dilaksanakan adalah pengujian struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan.

Kecepatan pendinginan boiler berpengaruh pada struktur mikro yang terbentuk. Pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* diperoleh struktur mikro *martensite* dan *ferrite*. Pada pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan FD Fan kapasitas 20% dan 40 % diperoleh struktur mikro *martensite* dan *pearlite*. Kekerasan rata-rata yang dihasilkan dengan *natural cooling* adalah 202,7 HV, *forced cooling* dengan FD Fan kapasitas 20% dan 40% adalah 204,1 HV dan 199,8 HV. Hasil pengujian kekuatan tarik didapatkan hasil untuk *natural cooling* adalah 660,28 MPa dan *forced cooling* dengan FD Fan kapasitas 20% dan 40% adalah 635,18 MPa dan 646,84 MPa. Selain berpengaruh pada sifat mekanik, variasi pendinginan boiler juga berpengaruh terhadap penurunan nilai elongasinya, dari 23,84 % untuk *natural cooling* dan untuk *forced cooling* adalah 21,61 dan 20,92% .

Kata kunci : *Forced cooling*, struktur mikro, kekuatan tarik, kekerasan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS THE EFFECT OF FORCED COOLING RATE ON MICROSTRUCTURE, TENSILE STRENGTH AND HARDNESS OF SUPERHEATER TUBE IN PULVERIZED COAL BOILER

Mahasiswa Nama : Andri
Mahasiswa ID : 2116207724
Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno,ST.MT

ABSTRACT

The duration of down time for planned and unplanned outages have potential impact to decrease the availability of power generation. Therefore, the duration of downtime is expected to be as short as possible. According to Pareto Loss Output Data of FTP-1 Power Plant at 2016 - 2017, boiler leakage still be the top ten problems that often happens. Cooling process in boiler maintenance play an important role related to downtime duration. In addition to natural cooling, boiler forced cooling can be used to minimize the downtime.

This research aims to analyze the effect of forced cooling on micro structure, tensile strength and hardness of superheater tube. This research is conducted by modeling and simulation the rate of boiler cooling using CFD software. Cooling time simulation obtained from the modeling result. The superheater material was heated using laboratory Ash furnace up to 540°C and cooled using temperature controlled afterwards, according to the modeling results. Furthermore, microstructural analysis, tensile strength and hardness testing were carried out.

The result shows that the cooling rate is increase with the use of forced cooling than natural cooling. Cooling rate affects the microstructure formed. At natural cooling method obtained ferrite and Pearlite microstructure with grain size 3,37 μm . At forced cooling method using FD Fan capacity 20% and 40% obtained ferrite and Pearlite micro structure with grain size 3,37 μm and 4,22 μm . The average hardness on natural cooling metode were 202.7 HV, forced cooling with FD Fan capacity of 20% and 40% were 204.1 HV and 199.8 HV. Tensile strength test results for natural cooling are 660, 28 MPa and forced cooling with FD Fan capacity of 20% and 40% are 635,18 MPa and 646,84 MPa. cooling boiler metode also affects on percentage elongation value, Increase cooling rate cause decreasing of percentage elongation value, from 23.84% for natural cooling and for forced cooling is 21.61 and 20.92%

Keyword : Forced cooling, Microstructure, Hardness, Tensile Stength

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya tesis ini dapat terselesaikan tepat waktu. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang berkenan membantu dan mendukung baik secara moril dan materiil dalam proses penyelesaian tesis ini, antara lain:

1. Hidayah selaku istri , ketiga putra putri tercinta Salman, Zahra dan Mustofa, orang tua serta anggota keluarga lainnya yang selalu memberikan dukungan kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini, terima kasih buat kesabaran, motivasi, dukungan dan doa-doanya selama ini.
2. Dr. Eng. Sutikno, ST. MT selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan saran, motivasi serta ilmu-ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
3. Arif Wahjudi, ST. MT. Ph D, Suwarno, ST. MSc. Ph.D, dan Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST selaku dosen penguji.
4. Prof. Dr. Ir. Eng. Prabowo, M.Eng selaku Ketua Prodi Pasca Teknik Mesin.
5. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin ITS.
6. Bapak-bapak dan ibu-ibu dosen pengajar, seluruh staf dan karyawan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya
7. Seluruh jajaran direksi PT. PJB yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk belajar dan menuntut ilmu di Teknik Mesin FTI ITS Surabaya
8. Manajemen dan rekan-rekan UBJOM Paiton 9, terimakasih atas dukungan, bantuan, dan referensi data penelitian yang diberikan selama ini.
9. Rekan-rekan Manajemen Energi Teknik Mesin FTI-ITS.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas dukungan dan bantuannya selama ini.

Kekurangan atau kesalahan tentu masih ada, namun bukan suatu yang disengaja, hal tersebut semata-mata disebabkan karena kekhilafan dan keterbatasan

yang dimiliki. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan Tesis ini.

Akhir kata, semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta dapat memberikan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Aamiin yaa robbal'alamiin.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1. Tinjauan Metalurgi	7
2.1.1 Metalurgi	7
2.1.2 Diagram Fe-C	9
2.1.3 Critical Transformation Temperatur	11
2.1.4 Isothermal transformation temperatur	14
2.2. Tinjauan studi numerik konveksi paksa.....	16
2.2.1 Perpindahan panas secara konveksi	16
2.2.2 Lapisan batas panas (<i>Thermal Boundary layer</i>)	20
2.3. Penentuan dampak dan waktu optimal	26
2.4. Penelitian Terdahulu.....	27
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1. Tahap – Tahap Penelitian	31
3.2. Diagram Alir Penelitian	32
3.3. Pengumpulan Data operasi	33
3.4. Pemodelan dan simulasi.....	36
3.4.1 Tahap preprocessing	37
3.4.2 Domain pemodelan	39
3.4.3 Meshing	39
3.4.4 Tahap proessing	39
3.4.5 Tahap Post processing	41
3.4.6 Rancangan simulasi numeric	41
3.5. Eksperimen pendinginan boiler dan pengujian.....	42
3.5.1 Eksperimen pemanasan dan pendinginan	42
3.5.2 Pengujian struktur mikro dan sifat mekanikal material	44
3.6. Analisis dan kesimpulan	45

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil simulasi numerik	47
4.1.1 Hasil simulasi numerik untuk pendinginan Forced Cooling kapasitas 20% dan 40%	50
4.2. Hasil dan analisa data pengujian mikrostruktur.....	54
4.3. Hasil dan pembahasan data pengujian Kekerasan dan kekuatan tarik	58
4.3.1 Pengujian kekerasan	58
4.3.2 Pengujian kekuatan tarik	62
4.4. Hasil Analisa numeric distribusi temperatur area superheater	64
 BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	73
5.2. Saran	74
 DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Pareto Losses Output FTP-1 tahun 2016.....	2
Gambar 1.2	Pareto Losses Output FTP-1 tahun 2017	2
Gambar 2.1	<i>Lattice</i> dan sel	7
Gambar 2.2	Dua Tipe <i>Lattice</i>	8
Gambar 2.3	Diagram kesetimbangan batas kelarutan fasa Fe – C	9
Gambar 2.4	Baja <i>eutectoid</i>	12
Gambar 2.5	Baja Hypoeutectoid	13
Gambar 2.6	Baja Hypereutectoid	13
Gambar 2.7	Salah satu tipe Isothermal transformation diagram	14
Gambar 2.8	Lapis batas kecepatan (<i>velocity boundary layer</i>)	17
Gambar 2.9	Lapis batas kecepatan (<i>velocity boundary layer</i>) pada pelat datar.....	18
Gambar 2.10	Batas lapisan thermal	20
Gambar 2.11	Type pola aliran diatas bola dan streamline body serta daya.....	24
Gambar 2.12	golf ball reduces C_D	25
Gambar 2.13	Struktur mikro dengan <i>cooling rate</i> 0.7 °C	27
Gambar 2.14	<i>Struktur mikro</i> dengan <i>cooling rate</i> 7.5 °C.....	28
Gambar 2.15	CCT Diagram setelah deformasi Austenite.....	29
Gambar 2.16	Hasil pengujian tensile test vs temperature	30
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan penelitian	33
Gambar 3.2	Grafik kenaikan temperatur steam pada saat start up boiler.....	36
Gambar 3.3	grafik penurunan <i>metal temperature superheater</i> saat shutdown boiler dengan pendinginan secara <i>natural cooling</i>	36
Gambar 3.4	Gambar teknis Boiler PLTU Paiton 9	38
Gambar 3.5	Meshing Geometri	39

Gambar 3.6	Grafik kenaikan temperatur uap superheat boiler saat start up.....	43
Gambar 3.7	Peralatan Ash Furnace laboratorium	44
Gambar 3.8	Peralatan Uji SEM	44
Gambar 3.9	bentuk spesimen Uji kekuatan tarik	45
Gambar 4.1	Posisi pengambilan data temperatur pada boiler	47
Gambar 4.2	Grafik penurunan temperatur 540 °C - 300 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling	48
Gambar 4.3	Grafik penurunan temperatur 300 °C s.d 200 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling.....	48
Gambar 4.4	Grafik penurunan temperatur 200 °C s.d 100 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling	49
Gambar 4.5	Grafik penurunan temperatur 100 °C s.d 60 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling	49
Gambar 4.6	Grafik perbandingan temperatur hasil simulasi dan data operasi saat shutdown boiler dengan pendinginan secara natural	50
Gambar 4.7	Grafik hasil simulasi penurunan temperatur pipa superheat boiler dengan pendinginan secara force cooling menggunakan FD Fan kapasitas 20%	51
Gambar 4.8	Grafik hasil simulasi penurunan temperatur pipa superheat boiler dengan pendinginan secara force cooling menggunakan FD Fan kapasitas 40%	52

Gambar 4.9	Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk natural cooling	53
Gambar 4.10	Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk forced cooling dengan kapasitas FD Fan 20%	53
Gambar 4.11	Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk forced cooling dengan kapasitas FD Fan 40%	53
Gambar 4.12	Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan natural dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x(b)	55
Gambar 4.13	Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan type <i>natural cooling</i> kapasitas 20% FD Fan dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x(b)	56
Gambar 4.14	Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan type forced cooling kapasitas 40% FD Fan dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x(b)	57
Gambar 4.15	Hasil pengujian kekerasan	61
Gambar 4.16	Pengaruh Pendinginan boiler pada kekuatan Tarik dan % Elongasi pada material tube superheater T91 menggunakan natural cooling dan forced cooling dengan 20% dan 40% kapasitas FD Fan	63
Gambar 4.17	Pengaruh Pendinginan boiler pada kekuatan pada material tube superheater T91 menggunakan natural cooling dan forced cooling dengan 20% dan 40% kapasitas FD Fan	64
Gambar 4.18	Posisi pengamatan penampang vertikal simetri boiler (<i>x-center</i>) area superheater.....	65

Gambar 4.19	Tampilan ilustrasi vector kecepatan dari <i>burner air</i> hingga keluar menuju boiler <i>outlet</i>	66
Gambar 4.20	Tampilan ilustrasi arrangement <i>tube superheater</i> tampak depan (a) dan tampak samping (b)	66
Gambar 4.21	Kontur distribusi temperatur pada posisi penampang vertikal simetri superheater (<i>x-center</i>) pada pendinginan boiler forced cooling FD fan 20%	67
Gambar 4.22	Kontur distribusi temperatur pada posisi penampang vertikal simetri superheater (<i>x-center</i>) pada pendinginan boiler forced cooling FD fan 40%	67
Gambar 4.23	Grafik perbandingan <i>average temperature</i> penampang superheater untuk pendinginan boiler dengan forced cooling 20%	68
Gambar 4.24	Grafik perbandingan <i>average temperature</i> penampang superheater untuk pendinginan boiler dengan forced cooling 40%	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Fasa yang ada pada baja	11
Tabel 2.2 Sifat mekanik pada material uji	28
Tabel 3.1 Batasan komposisi kimia material T91	33
Tabel 3.2 Sifat Mekanik material T91 berdasarkan standar ASTM A213M – 15a	34
Tabel 3.3 Spesifikasi Boiler Paiton 9	34
Tabel 3.4 spesifikasi dari <i>force draft fan</i> dan <i>Induce draft fan</i>	35
Tabel 3.5 Nilai Parameter Model	40
Tabel 3.6 Properti udara pada inlet boiler	41
Tabel 3.7 Rancangan Simulasi Numerik	42
Tabel 3.8 eksperimen pemanasan dan pendinginan pada 3 jenis bahan uji .	43
Tabel 3.9 Rencana dan jadwal kerja penelitian dan penyusunan tesis	46
Tabel 4.1 Parameter Operasi Boiler PLTU Paiton 9	51
Tabel 4.2 Cooling rate Natural Cooling, Forced Cooling 20% FD Fan dan Forced Cooling 40% FD Fan	54
Tabel 4.3 Hasil Pengujian kekerasan untuk material awal	59
Tabel 4.4 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode natural cooling	60
Tabel 4.5 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%	60
Tabel 4.6 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%	61
Tabel 4.7 Nilai kekuatan Tarik maksimum dan persentase elongasi pada perlakuan panas dan peninginan secara natural dan force material tube superheater T91	63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

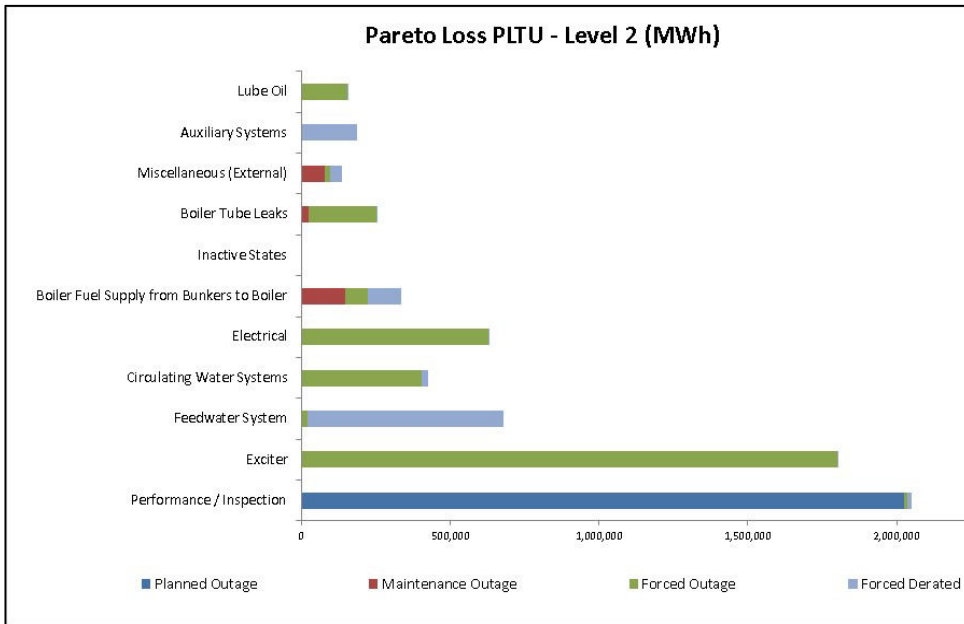
1.1 Latar Belakang

Availability atau kesiapan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan faktor yang penting, dikarenakan salah satu pendapatan dari sebuah Pembangkit Listrik adalah berdasarkan kesiapannya yang di cerminkan dalam EAF (*Equivalent Availability Factor*). Faktor yang berlawanan dengan *Availability* adalah *Outage*. *Outage* terjadi apabila suatu unit tidak sinkron ke jaringan dan bukan dalam status *Reserve Shutdown*.

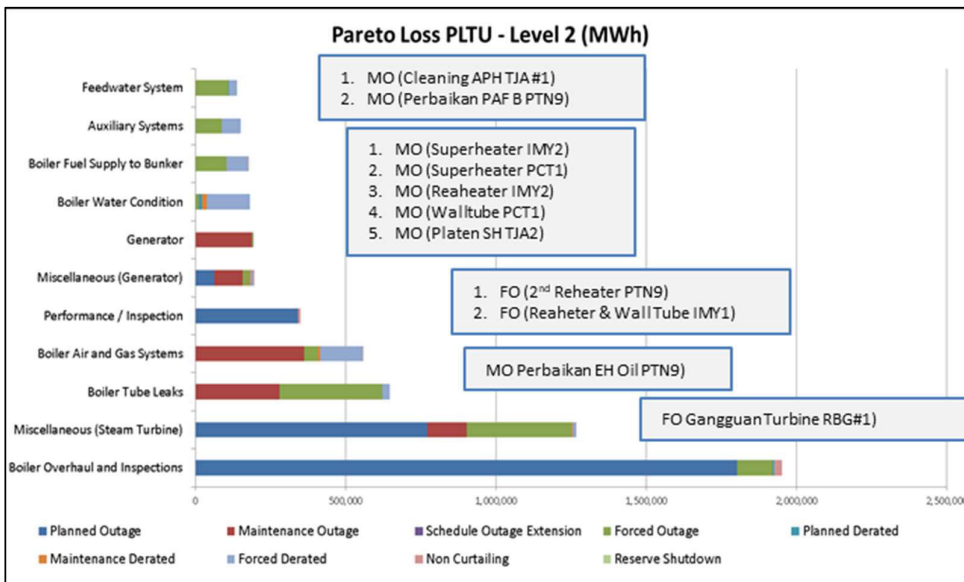
Outage terdiri dari :

1. *Outage* terencana (*Planned Outage*), yaitu keluarnya pembangkit akibat adanya pekerjaan pemeliharaan periodic seperti inspeksi, *overhaul* atau pekerjaan lainnya yang sudah dijadwalkan sebelumnya dalam rencana tahunan pemeliharaan pembangkit atau sesuai rekomendasi pabrikan. Dalam kriteria ini termasuk PO dan MO.
2. *Outage* tidak terencana (*Forced Outage*) : yaitu keluarnya pembangkit akibat adanya kondisi emergensi pembangkit atau adanya gangguan yang tidak diantisipasi sebelumnya serta tidak digolongkan ke dalam *Outage* terencana MO atau PO. [1]

Forced Outage tidak diinginkan dalam pengoperasian Pembangkit listrik, sehingga *Forced Outage* perlu dihindari atau durasinya diperpendek/dipercepat. Salah satu penyebab *forced outage* pada PLTU adalah terjadinya kebocoran pada tube boiler. Berdasarkan Pareto Loss Output (PLO) Unit PLTU FTP-1 Jawa (PLTU Indramayu, PLTU Rembang, PLTU Pacitan, PLTU Tanjung Awar Awar, PLTU Paiton 9) tahun 2016 dan 2017 ditunjukkan pada gambar 1.1 dan 1.2, menunjukkan kebocoran boiler masih menjadi sepuluh besar gangguan yang sering terjadi.



Gambar 1.1 Pareto Losses Output FTP-1 tahun 2016



Gambar 1.2 Pareto Losses Output FTP-1 tahun 2017

Dengan adanya kebocoran pada boiler maka langkah yang akan dilakukan adalah mengganti pipa yang bocor tersebut. Berdasarkan data sebelumnya, aktivitas perbaikan kebocoran baru bisa ditangani bila temperature metal < 60 °C karena sudah aman bagi pekerja di area tersebut. Penurunan temperatur metal tube superheater boiler saat normal operasi sampai < 60 °C apabila menggunakan pendinginan secara alami membutuhkan waktu sekitar 5,8 hari (140 jam). Untuk

mempercepat penurunan temperature maka diperlukan *forced cooling* (pendinginan paksa) menggunakan hembusan udara dari *Forced Draft Fan*. Untuk mencapai target memperpendek durasi *Forced Outage* karena kebocoran pada tube boiler, maka mempercepat durasi pendinginan boiler merupakan salah satu kunci keberhasilan. Namun diharapkan tidak menimbulkan dampak pada struktur mikro, kekuatan Tarik dan kekerasan material tube superheater. Oleh karena itu studi pengaruh *forced cooling* pada material tube boiler perlu dilakukan.

Penelitian terdahulu yang mempelajari pengaruh kecepatan *forced cooling* terhadap mikrostruktur material telah banyak dilakukan, L. Ceschini et. al telah meneliti bahwa *Cooling rate* yang rendah (0.7 °C/s) pada material *medium C microalloy steel* menghasilkan perubahan mikrostruktur pada material yang sebelumnya memiliki ukuran grain yang besar pada fasa austenite menjadi mikrostruktur campuran yang mengandung *perlite*, *proeutectoid ferrite* dan *bainite*, dengan sifat *elongation* sampai terjadinya kegagalan yang baik namun sifat *toughnes* terhadap benturan rendah. *Cooling rate* yang lebih tinggi (7.5 °C/s) pada material *medium C microalloy steel* menunjukkan hasil yang sebaliknya, yaitu terjadi penurunan ukuran *grain* pada fasa *austenite* dan menyebabkan pembentukan mikrostruktur campuran yang terdiri dari *acicular ferrite* dan *martensite*. Dengan sifat mekanik *tensile strength* yang tinggi dengan *elongation* yang rendah dan *toughness* terhadap benturan yang tinggi [2]. D.Q. Bai et.al melakukan penelitian terhadap perubahan temperatur pada baja Mo-Nb-B akan menurun dengan kenaikan *cooling rate*. Pada *cooling rate* yang tinggi pembentukan *plate-like ferrite* dapat dihilangkan secara total [3]. Jenan Mohammed Nagie mempelajari bahwa Sifat mekanik baja sangat berhubungan dengan mikrostruktur dari baja tersebut, yang didapatkan setelah perlakuan pemanasan. Secara umum hal ini dilakukan untuk mendapatkan *hardness* yang bagus, *tensile strength* dan *ductility* yang sesuai. Untuk mengetahui fasa yang dihasilkan setelah pemanasan dan pengaruhnya pada sifat mekanik [4]. L. Storojeva et.al telah melakukan penelitian mengenai *Heavy Warm Deformation* (HWD) pada baja dengan mikrostruktur awal *ferrite-pearlite* setelah didinginkan dengan *cooling rate* 10 °K/s menghasilkan distribusi yang homogen dengan *cementite* pada matriks *grain ferrite* yang baik, yaitu sekitar 65 – 70 % memiliki sudut batas grain yang tinggi. Sebaliknya *Heavy Warm Deformation*

pada baja dengan struktur mikro awal *ferrite-Pearlite-Bainite* setelah didinginkan dengan *cooling rate* 20 °K/s menghasilkan distribusi *cementite* yang tidak homogen pada area partikel *cementite* yang baik, dan hanya 45 % *grain ferrite* yang memiliki sudut batas tinggi [5]. S.Serajzadeh melakukan penelitian modeling secara matematis, dimanfaatkan dalam rangka untuk memprediksi temperature dan perubahan fasa selama pendinginan pada baja dengan kadar carbon rendah [6]. J. Van den Bosch et al melakukan penelitian pengaruh temperature dan *strain rate* pada sifat mekanik material T91 yang diuji menggunakan larutan lead bismuth eutectid. Pengaruh temperature pada sifat *ductility* menunjukkan penurunan dengan kenaikan temperature [10]. Dari penelitian penelitian yang telah dilakukan, penelitian terkait pengaruh kecepatan *forced cooling* pada struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan pada superheater *Pulverized Coal Boiler* belum dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Pada latar belakang masalah yang telah dijelaskan diatas, kecepatan dalam pendinginan boiler merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi durasi waktu perbaikan kebocoran tube pada Boiler. Oleh karena itu penelitian ini akan fokus pada masalah dampak yang kemungkinan timbul disebabkan oleh beberapa kecepatan *forced cooling* terhadap struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan pada *tube superheater*.

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada perumusan masalah diatas, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

Menganalisa pengaruh kecepatan *forced cooling* pada struktur mikro, Kekuatan Tarik dan kekerasan pada material superheater berdasarkan hasil simulasi software CFD, sehingga didapatkan metode yang optimum dalam proses pendinginan boiler untuk perbaikan kebocoran tube boiler.

1.4 Batasan Masalah

Shutdown Boiler PLTU secara umum dilakukan dengan *natural cooling*, hal ini bertujuan agar proses pendinginan pada tube boiler dapat merata. Namun pada suatu kondisi dimana PLTU mengalami *Forced Outage* karena terjadi kebocoran Tube Boiler maka dibutuhkan adanya *Forced Cooling* untuk memperpendek durasi perbaikan kebocoran tube boiler. Berdasarkan hal tersebut, agar permasalahan tidak melebar maka diperlukan beberapa batasan sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilaksanakan pada PLTU dengan kapasitas 660 MW di daerah Paiton, Jawa Timur.
2. Fokus penelitian pada material final tube superheater SA213 T91
3. Kondisi udara, kelembaban temperature diasumsikan hamper sama dan homogen
4. Transfer panas dalam penelitian ini terbatas pada konveksi

1.5 Manfaat Penelitian.

1.5.1 Manfaat Teoritis

Hasil penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi pengembangan metode pendinginan boiler dan mempelajari dampak *forced cooling* pada material tube superheater T91 :

1. Mengetahui pengaruh pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* terhadap struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan pada material tube superheater.
2. Pengembangan metode *force cooling* yang optimum untuk mendapatkan waktu pendinginan yang singkat

1.5.2 Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini dapat menjadi masukan bagi perusahaan untuk mereview dan mengoptimalkan SOP *shutdown* Boiler dengan mempertimbangkan kebutuhan durasi dari pendinginan Boiler.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

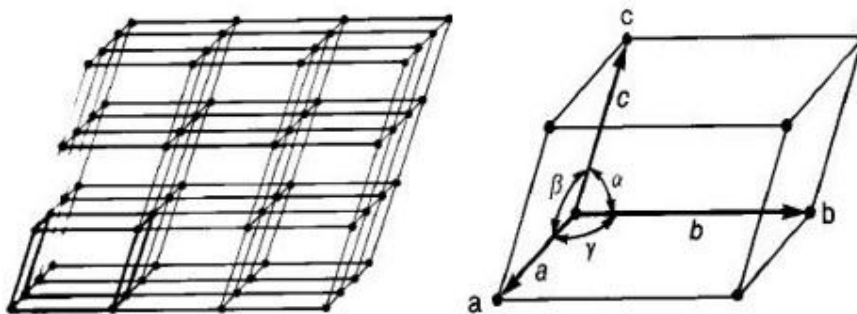
Pada bagian pendahuluan, penulis telah menjelaskan latar belakang mengapa penelitian ini diperlukan, beberapa pengantar penjelasan tentang metode yang digunakan, dan beberapa penelitian sebelumnya yang juga menjadi inspirasi dalam penelitian ini. Pada BAB 2, penulis akan sajikan kajian pustaka yang meliputi empat bagian, yaitu: Tinjauan metalurgi, perhitungan numerik konveksi paksa, penentuan dampak dan waktu optimal dan penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian ini.

2.1 Tinjauan Metalurgi

2.1.1 Metalurgi

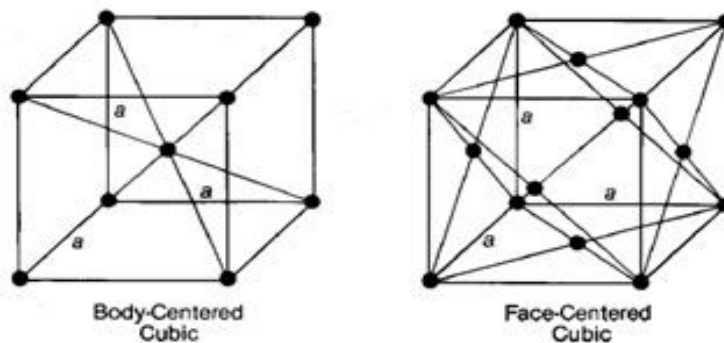
Boiler, *pressure vessel*, dan komponen yang terkait utamanya terbuat dari logam. Kebanyakan dari logam tersebut terbuat dari beberapa tipe baja, sedangkan yang kurang umum digunakan namun penting adalah penggunaan material *cast iron* dan paduan *nickel base*. Yang terakhir adalah penggunaan *ceramic* dan *refractories*, *coating* serta material kombinasi yang digunakan pada aplikasi khusus. [7]

Unit terkecil dari sebuah logam adalah atom. Pada struktur padatan, atom dari sebuah logam mengikuti pengaturan/pola yang teratur dan disebut *lattice*. Sebagai contoh dari sebuah *lattice* yang sederhana ditunjukkan pada gambar 2.1a dan satu sel disebut *emphazise*. Panjang sumbu dari 1 unit cell didefinisikan sebagai a , b dan c , dan sudut diantara a , b dan c disebut sebagai α , β dan γ (gambar 2.1).



Gambar 2.1 *Lattice* dan sel

Material baja digunakan pada boiler dan bejana bertekanan dibatasi oleh dua tipe *lattice* yaitu *Body-Centered cubic* (BCC) dan *Face-centered cubic* (FCC) (gambar 2.2). Dimana perubahan struktur atau interupsi terjadi didalam Kristal, hal ini dianggap sebagai *defect*. Batas kristal (*grain*) terjadi jika pengulangan secara sistematis dari sebuah sel untuk 1 kelompok atom berubah arah atau konfigurasinya menjadi group atom yang terpisah. Struktur minimum yang dapat berfungsi terdiri dari 1 kristal yang memiliki hubungan yang sama dengan keseluruhan unit cell dan memiliki sedikit *defect*.



Gambar 2.2 Dua Tipe *Lattice*

(Babcox & Wilcox, 1992)

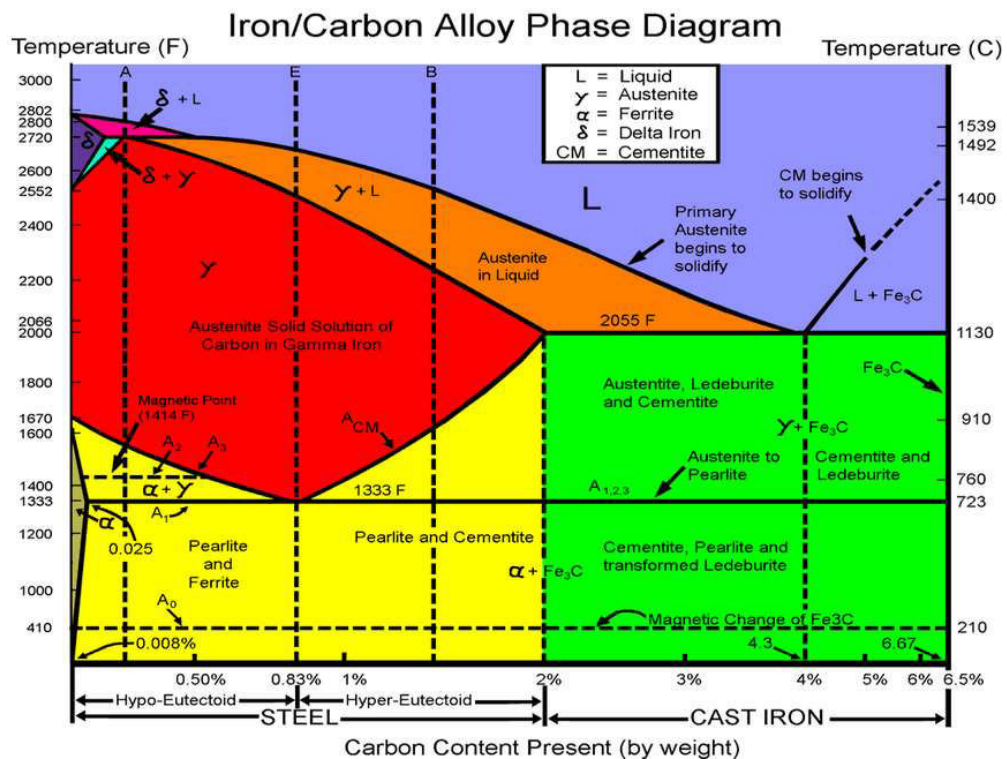
Struktur dan sifat logam murni sangat berubah apabila dipadu dengan unsur lain. Kelakuan bahan seperti ini dapat dilihat juga pada bahan cair dan gas, tetapi yang sangat mencolok terdapat pada bahan padat.

Bila bahan (komponen A) menjadi system 2 komponen dengan menambahkan komponen B, fasa baru tidak terbentuk apabila B larut dalam keadaan padat dalam A. tetapi apabila B dipadukan melebihi kelarutan maksimumnya maka akan terjadi campuran larutan padat jenuh dan berlebihan pada fasa B. Terkadang A dan B bereaksi satu sama lain membentuk fasa lain. Dalam sistem tiga komponen atau sistem berkomponen banyak maka sistem itu menjadi berfasa banyak yang lebih rumit. Sifat bahan berubah yang disebabkan oleh perbandingan campuran dan kondisi campuran fasa yang ada. Hubungan antara

jumlah setiap komponen dan fasa yang terjadi dapat dilihat pada diagram fasa yang dapat memberikan informasi mengenai sifat bahan. [8]

2.1.2 Diagram fasa Fe-C

Baja merupakan logam dengan base besi (Fe) yang juga mengandung manganese (Mn), Carbon dan elemen logam lainnya. Sebenarnya semua logam yang digunakan pada boiler dan bejana bertekanan adalah baja. Kandungan Mn dalam carbon steel umumnya sekitar 1%, sebagai elemen pengganti padatan-cairan. Karena ukuran atom dan struktur elektronnya sama dengan Fe maka pengaruhnya adalah pada *lattice* Fe atau diagram fase pada konsentrasi rendah. Sebaliknya hal ini berbeda dengan carbon, Carbon memiliki dampak yang signifikan. Dengan variasi kandungan carbon dan perlakuan panas pada Fe, akan didapatkan properties mekanikal dengan range yang banyak. Hal ini dapat dipelajari menggunakan diagram fase Fe-C pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Diagram kesetimbangan batas kelarutan fasa Fe – C

Gambar 2.3 Menunjukkan kelarutan maksimal carbon pada α (BCC) besi hanya sekitar 0.025%, sedangkan kelarutan maksimal carbon pada γ (FCC) besi sedikit diatas 2%. Logam dengan Fe – C diatas 2% digolongkan dalam besi lunak (besi Cor). Logam besi dengan kandungan C diatas 2 % termasuk dalam golongan logam yang memiliki properties mekanik kekuatan, kekerasan dan elastisitas yang rendah.

Atom carbon memiliki ukuran yang lebih kecil dari atom besi. Pada struktur besi BCC, carbon terletak pada sel satuan kubus pusat badan. Struktur ini disebut dengan *ferrite*. Pada struktur besi FCC, carbon terletak pada sel satuan kubus pusat muka. Struktur ini disebut dengan *austenite*. [7]

Besi dan baja diharapkan mempunyai kekuatan statis dan dinamik, ulet dan mudah diolah, tahan korosi dan mempunyai sifat electromagnet agar dapat dipakai sebagai bahan untuk konstruksi dan mesin mesin. Dilihat dari transformasi ada tiga macam baja yaitu :

1. Baja dengan titik transformasi A_1 , berupa *ferrite* dibawah A_1 dan *austenite* pada A_3 atau diatas A_1
2. Baja dengan titik transformasi a_1 dibawah temperature kamar berupa *austenite* pada temperature kamar
3. Baja dengan daerah *austenite* yang kecil, berupa *ferrite* sampai temperature tinggi pada daerah komposisi tertentu.

Baja dengan kelompok nomor 1 berupa *ferrite* pada temperature kamar (dalam keseimbangan), dapat diproses menjadi berbagai struktur dengan jalan perlakuan panas. Struktur tersebut diikhtisarkan pada table 2.1. Fasa fasa tersebut memiliki sifat sifat khas. *Ferrite* mempunyai sel satuan kubus pusat badan (BCC), menunjukkan titik mulur yang jelas dan menjadi getas pada temperature rendah. *Austenit* mempunyai sel satuan kubus pusat muka (FCC) menunjukkan titik mulur yang jelas tanpa kegetasan pada keadaan dingin. Akan tetapi kalau berupa fasa metastabil bisa berubah menjadi α' pada temperature rendah dengan perlakuan. Martensit adalah fasa larutan pada lewat jenuh dari karbon dalam sel satuan tetragonal pusat badan atau *body central tetragonal* (BCT). Makin tinggi derajat

kelewat kejenuhan karbon, makin besar perbandingan satuan sumbu sel satuannya dan makin keras serta makin getas *martensit* tersebut. *Bainit* mempunyai sifat antara *martensit* dan *ferit*.

Tabel 2.1 Fasa yang ada pada baja.

	Fasa dan simbol	Struktur	Pengelasan
Menurut kristal	Austenit (γ)	<i>fcc</i>	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi.
	Ferit (α)	<i>bcc</i>	Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas, dapat berada bersama Fe_3C (<i>sementit</i>) atau lainnya.
	Bainit (α)	<i>bcc</i>	Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat tertentu. Terjadi hanya presipitasi Fe_3C , unsur paduan lainnya tetap larut.
	Martensit (α')	<i>bct</i>	Fasa metastabil terbentuk dengan laju pendinginan cepat, semua unsur paduan masih larut dalam keadaan padat.
Menurut keadaan	Perlit		Lapisan ferit dan Fe_3C .
	Widmanstaetten		γ dan α dalam orientasi pada persipitasi ferit.
	Dendrit		Berbentuk cabang-cabang seperti pohon, struktur ini terbentuk karena segregasi karbon pada pembekuan.
	Sorbit Trostit		Sorbit adalah perlit halus dan trostit adalah bainit. Nama ini tidak banyak dipakai.

Sesuai dengan keanekaragaman strukturnya, maka dapat diperoleh berbagai sifat baja termasuk kekuatan dan keuletan. Faktor faktor yang menentukan sifat sifat mekanik adalah macam fasa, kadar unsur paduan dalam fasa, banyak fasa, ukuran dan bentuk senyawa. Untuk mendapatkan sifat sifat mekanik yang diinginkan perlu mendapat struktur yang cocok dengan komposisi kimia dan perlakuan panas yang tepat. [8]

2.1.3 Critical Transformation Temperatur

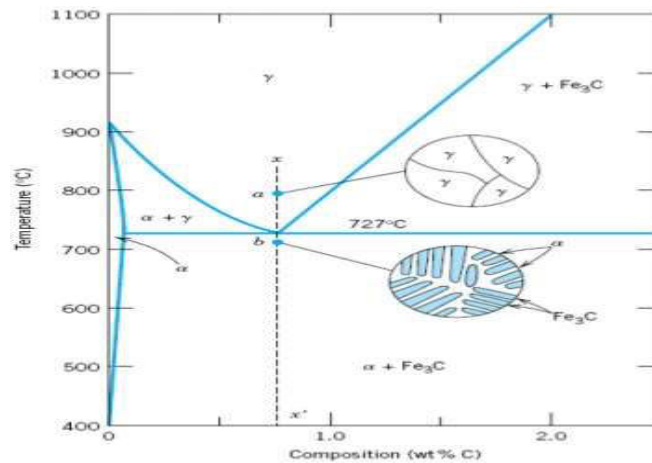
Diagram fasa mempunyai 3 titik invarian yaitu titik *peritectic* (pada suhu 1493 °C), titik *eutectic* (pada suhu 1147°C dan C=4,3%) dan titik *eutectoid* (pada suhu 723 °C dan C=0,8%). Titik-titik invarian ini terdiri dari 3 fasa yang berada dalam kesetimbangan :

1. Reaksi *peritectic* : $L + \delta = \gamma$
2. Reaksi *eutectic* : $L = \gamma + Fe_3C$
3. Reaksi *eutectoid* : $\gamma = \alpha + Fe_3C$

Jadi fasa-fasa pada diagram Fe-C adalah fasa cair L, *ferrite- δ* , *austenit* (γ), *ferrite- α* dan *cementite* (Fe_3C). Berdasarkan kadar C, baja dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu : baja *eutectic*, *hypoeutectoid* dan baja *hypereutectoid*.

1. Baja *Eutectoid*

Jika baja *eutectoid* dengan kadar C=0,8 % didinginkan dari suhu misal 800 °C sampai suhu kamar, maka akan terjadi serangkaian perubahan fasa (transformasi fasa) seperti pada gambar 1.3 di bawah.



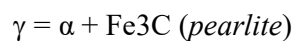
Gambar 2.4. Baja *eutectoid*

Saat suhu mencapai 723 °C, reaksi *eutectoid* terjadi menurut persamaan : $\gamma = \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Struktur mikro yang terbentuk berupa lapisan *a* (*ferrite*) dan *cementite* (Fe_3C). Struktur ini dinamakan *perlit* (*pearlite*). Struktur *perlit* ini disebabkan karena perbedaan konsentrasi C antara fasa γ (0,8 %C), *ferrite* (0,02 %C) dan *cementite* (6,7 %C) sehingga terjadi difusi. Atom-atom karbon pada *ferrite* akan bergerak menuju interface/batas antara $\text{Fe}_3\text{C}/\gamma$ sehingga membentuk fasa Fe_3C .

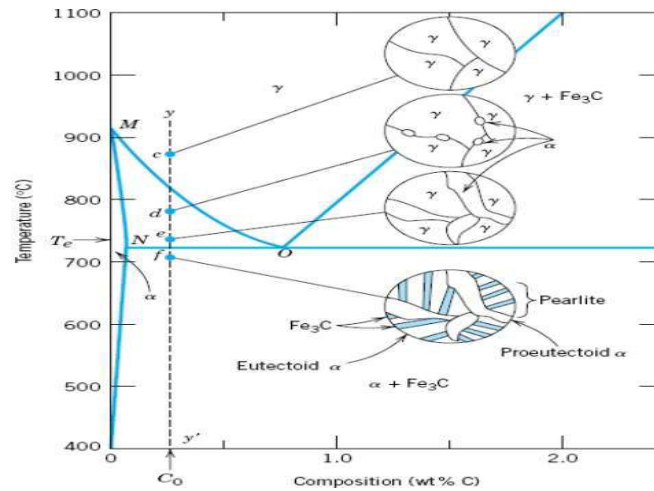
2. Baja *Hypoeutectoid*

Baja *hypoeutectoid* adalah baja dengan kadar C antara 0,02-0,76 %. Jika baja dengan kadar $C_0 = 0,4 \%C$ didinginkan dan suhu 900 °C (titik a) pada gambar 1.4 maka akan terjadi perubahan struktur mikro sbb. :

Pada suhu 900 °C, baja dalam bentuk *austenit*. Jika suhunya turun sampai titik b, *ferit* mulai tumbuh pada butir *austenit*. *Ferrite* ini dinamakan *proeutectoid ferrite*. Pendinginan selanjutnya pada suhu c menyebabkan bertambahnya jumlah *proeutectoid ferrite* sampai semua batas butir *austenit* dipenuhi *proeutectoid ferrite*. Pada suhu di bawah 723 °C (titik d), sisa *austenit* berubah menjadi *pearlite* menurut reaksi :



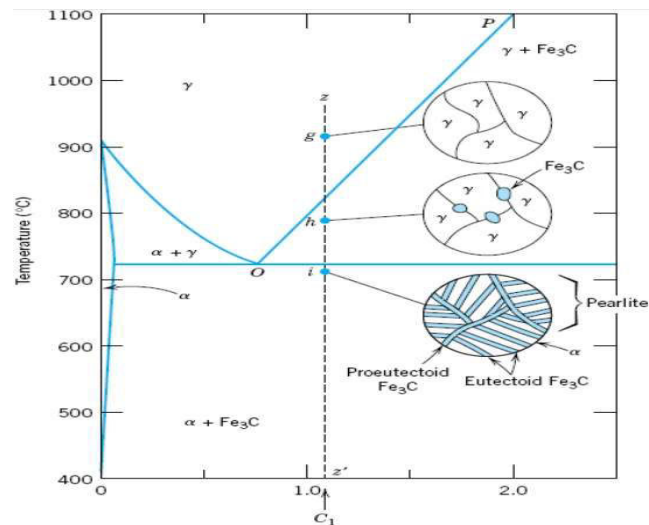
Jadi struktur akhir berupa *ferrite* pada batas butir (*proeutectoid ferrite*) dan perlit.



Gambar 2.5. Baja hypoeutectoid

3. Baja hypereutectoid

Baja *hypereutectoid* adalah Baja dengan kadar C antara 0,8-2,14 %. Perubahan fasa yang terjadi selama pendinginan dapat dijelaskan sbb. :



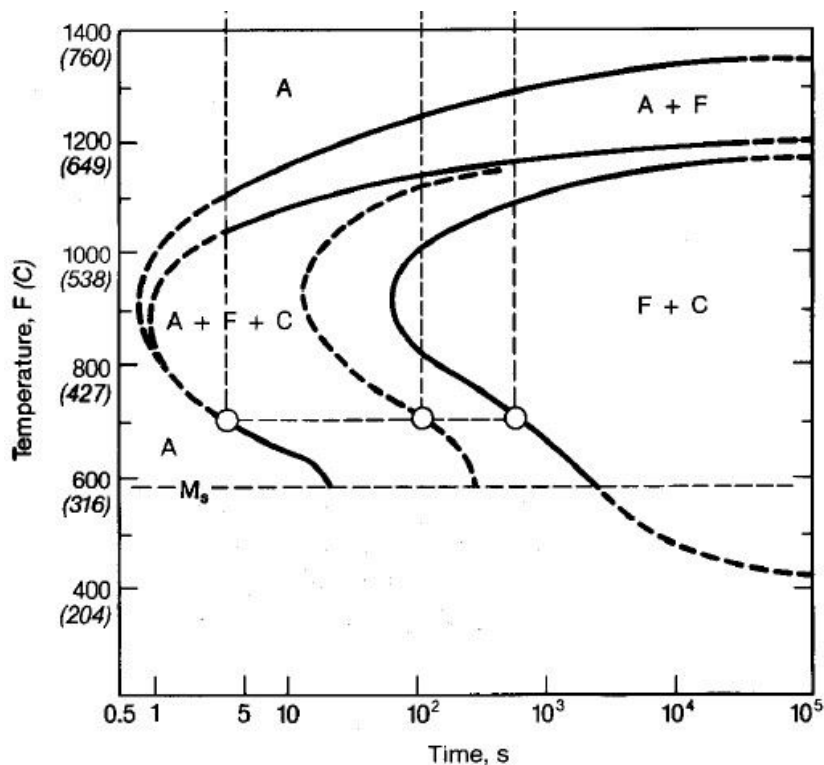
Gambar 2.6. Baja hypereutectoid

Pada titik a, baja *hypereutectoid* berada dalam bentuk austenit. Jika suhu turun sampai titik b, cementite (Fe_3C) mulai terbentuk sepanjang batas butir *austenite*. Pada titik b, jumlah *cementite* bertambah sampai batas butir austenit tertutupi oleh cementite. Di bawah suhu *eutectoid*, sisa austenit akan berubah menjadi

perlit. Hasil akhir berupa *cementite* yang terbentuk sebelum reaksi eutectoid (dinamakan *proeutectoid cementite*) dan *perlit*. [7]

2.1. 4 Isothermal transformation diagram

Garis transformasi pada diagram kesetimbangan (gambar 2.7) menunjukkan pergeseran bila baja dengan fasa *austenit* didinginkan dengan cepat atau ketika fasa *pearlite* dan *ferrite*, atau *pearlite* dan *cementite* dipanaskan dengan cepat. Perlakuan tersebut akan membawa perbaikan dari fasa A_1 dan A_3 menjadi A_{c1} dan A_{c3} pada proses pemanasan, dan bergeser menjadi A_{r1} dan A_{r3} pada proses pendinginan. Hal yang sangat berpengaruh saat pemanasan dan pendinginan dengan suhu tetap (*Isothermal*) dalam pergeseran ini adalah waktu. Isothermal transformation experiment digunakan untuk menentukan waktu perubahan fasa pada waktu tertentu. Data di plotkan pada diagram *time-temperatur-transformation* (TTT).



Gambar 2.7 Salah satu tipe *Isothermal transformation diagram*.

Beberapa sifat mekanik yang penting dalam material baik sebagai evaluasi maupun saat pemilihan material, antara lain:

1. Kekuatan (*strength*)
Merupakan kemampuan suatu material untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan material menjadi patah. Berdasarkan pada jenis beban yang bekerja, kekuatan dibagi dalam beberapa macam yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan torsi, dan kekuatan lengkung.
2. Kekakuan (*stiffness*)
Adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan/beban tanpa mengakibatkan terjadinya *deformasi* atau *defleksi*.
3. Kekenyalan (*elasticity*)
Didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan, atau dengan kata lain kemampuan material untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah mengalami deformasi (perubahan bentuk).
4. Plastisitas (*plasticity*)
Adalah kemampuan material untuk mengalami deformasi plastik (perubahan bentuk secara permanen) tanpa mengalami kerusakan. Material yang mempunyai plastisitas tinggi dikatakan sebagai material yang ulet (*ductile*), sedangkan material yang mempunyai plastisitas rendah dikatakan sebagai material yang getas (*brittle*).
5. Keuletan (*ductility*)
Adalah suatu sifat material yang digambarkan seperti kabel dengan aplikasi kekuatan tarik. Material *ductile* ini harus kuat dan lentur. Keuletan biasanya diukur dengan suatu periode tertentu, persentase keregangannya. Sifat ini biasanya digunakan dalam bidang perteknikan, dan bahan yang memiliki sifat ini antara lain besi lunak, tembaga, aluminium, nikel, dll.
6. Ketangguhan (*toughness*)
Merupakan kemampuan material untuk menyerap sejumlah energi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan.
7. Kegetasan (*brittleness*)
Adalah suatu sifat bahan yang mempunyai sifat berlawanan dengan keuletan. Kerapuhan ini merupakan suatu sifat pecah dari suatu material

dengan sedikit pergeseran permanent. Material yang rapuh ini juga menjadi sasaran pada beban regang, tanpa memberi keregangan yang terlalu besar. Contoh bahan yang memiliki sifat kerapuhan ini yaitu besi cor.

8. Kelelahan (*fatigue*)

Merupakan kecenderungan dari logam untuk menjadi patah bila menerima beban bolak-balik (*dynamic load*) yang besarnya masih jauh di bawah batas kekakuan elastiknya.

9. Melar (*creep*)

Merupakan kecenderungan suatu logam untuk mengalami deformasi plastik bila pembebanan yang besarnya relatif tetap dilakukan dalam waktu yang lama pada suhu yang tinggi.

10. Kekerasan (*hardness*)

Merupakan ketahanan material terhadap penekanan atau indentasi / penetrasi. Sifat ini berkaitan dengan sifat tahan aus (*wear resistance*) yaitu ketahanan material terhadap penggoresan atau pengikisan.

2.2 Tinjauan studi numerik konveksi paksa.

2.2.1 Perpindahan panas secara konveksi.

Konveksi adalah mekanisme perpindahan panas melalui suatu fluida disertai dengan perpindahan molekul molekul dari fluida tersebut. Konveksi dibagi menjadi dua, yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa tergantung pada pergerakan fluida tersebut. Pada konveksi bebas, gerakan fluida disebabkan langsung oleh gaya apung (*Bouyancy Forced*) yang timbul akibat perubahan densitas karena pengaruh dari variasi temperature aliran. Sedangkan pada konveksi paksa gerakan fluida disebabkan oleh energy dari luar seperti pompa atau fan.

Laju perpindahan panas konveksi dapat dirumuskan dengan persamaan hukum Newton sebagai berikut :

$$q''_{\text{konveksi}} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{konveksi}} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

dimana:

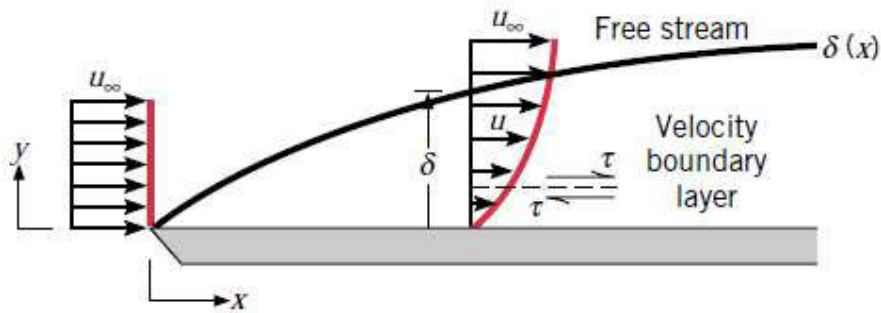
q'' = fluks perpindahan panas konveksi (W/m^2)

Q = Laju perpindahan panas (W)

- h = koefisien konveksi (W/m² K)
- T_s = temperatur permukaan (K)
- T_∞ = temperatur fluida (K)

Koeffisien heat transfer konveksi (h) sangat tergantung pada properties fluida dan kekasaran dari permukaan padat, dan type dari aliran fluida tersebut. (laminer atau turbulen).

Lapis batas kalor (*thermal boundary layer*) didefinisikan sebagai daerah dimana terdapat gradien temperatur dalam aliran. Gradien temperatur terjadi karena proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding. Perkembangan *thermal boundary layer* pada pelat horisontal ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.8 Lapis batas kecepatan (*velocity boundary layer*)
(Incropera dan Dewitt, 2005)

Apabila pelat itu dipanaskan, terbentuklah suatu lapisan batas konveksi bebas. Profil kecepatan pada dinding adalah nol, karena terdapat kondisi tanpa gelincir (*no slip*).

Sebagai hasilnya heat transfer dari permukaan padat ke batas fluida yang berdekatan dengan permukaan adalah murni konduksi karena fluida tersebut dalam keadaan diam. Sehingga :

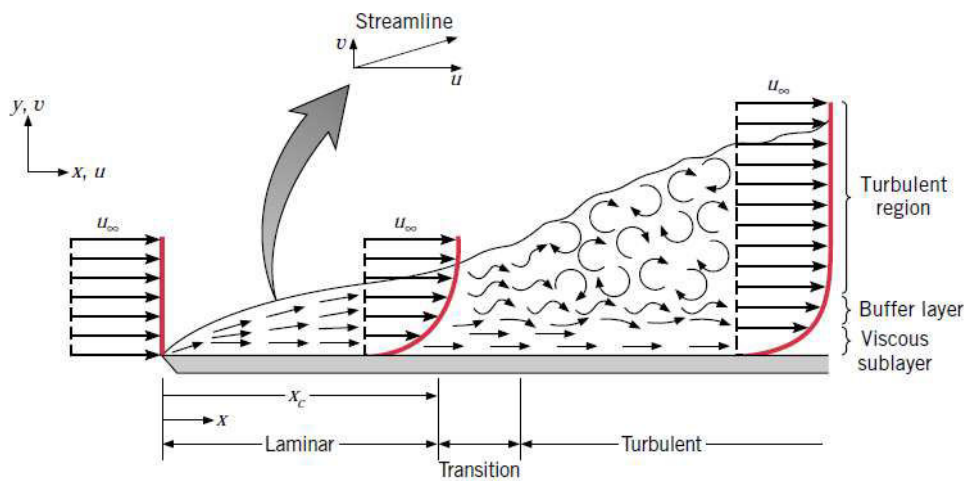
$$q''_s = -k_f \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (2.3)$$

$$q''_s = h(T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

Kombinasi dari kedua persamaan diatas menjadi :

$$h = \frac{-k_f \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (2.5)$$

Koeffisien heat transfer konveksi secara umum bervariasi sesuai dengan arah aliran. Rata rata nilai koeffisien heat transfer konveksi pada permukaan (*surface*) ditentukan oleh rata rata koeffisien heat transfer lokal pada seluruh permukaan. Mempertimbangkan flow pada fluida diatas pelat datar, maka kecepatan dan temperatur fluida yang mendekati pelat sama pada U_∞ dan T_∞ . Fluida tersebut dapat dianggap sebagai lapisan yang berdekatan di atas satu sama lain.



Gambar 2.9 Lapis batas kecepatan (*velocity boundary layer*) pada pelat datar
(Incropera dan Dewitt, 2005)

Dengan asumsi tidak ada kondisi slip (*no-slip condition*) di dinding, kecepatan lapisan fluida di dinding adalah nol. Lapisan tak bergerak memperlambat partikel pada lapisan fluida yang berdekatan, sebagai akibat dari gesekan antara dua lapisan yang berdekatan. Adanya plat dan daerah agak jauh dari plat dimana kecepatan fluida U_∞ tetap tidak berubah, daerah ini disebut lapisan batas kecepatan (*velocity lapisan batas*).

Lapisan batas region adalah daerah di mana efek kental (*viscous*) dan perubahan kecepatan signifikan, sementara *inviscid region* adalah daerah dimana efek gesekan dapat diabaikan dan kecepatan secara umum dianggap konstan.

Gesekan diantara dua lapisan yang berdekatan antara dua lapisan sama dengan *drag force* (*friction force*). *Drag force* per satuan luas disebut tegangan geser (shear stress) :

$$\tau_s = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (2.6)$$

dimana μ merupakan *viscosity dynamic* dari fluida, $kg/m.s$ or $N.s/m^2$. Viskositas adalah ukuran ketahanan fluida terhadap aliran, dan sangat dipengaruhi suhu (fungsi suhu). Shear stress pada permukaan juga dapat ditentukan dari:

$$\tau_s = C_f \frac{\rho U_\infty^2}{2} \quad (2.7)$$

dimana C_f merupakan koefisien friksi atau koefisien drag dimana nilainya ditentukan secara eksperimen pada hampir seluruh kasus. Drag force dihitung dengan :

$$F_s = C_f A \frac{\rho U_\infty^2}{2} \quad (2.8)$$

Aliran pada lapisan batas dimulai *smooth* dan lancar disebut aliran laminar. Pada jarak tertentu dari tepi terdepan, aliran berubah menjadi tak beraturan, yang disebut aliran turbulen, ditandai oleh fluktuasi kecepatan dan gerakan yang sangat tidak teratur. Transisi dari aliran laminar ke turbulen terjadi melalui daerah yang disebut *transitionregion*.

Profil kecepatan pada region laminar hampir menyerupai parabola, dan menjadi datar pada aliran turbulen. Turbulent region dapat dipertimbangkan dari tiga region: sublayer laminar (dimana efek *viscous* dominan), *buffer layer* (dimana ada efek laminar dan turbulen), dan lapisan turbulen. Pencampuran kuat fluida dalam aliran turbulen meningkatkan panas dan transfer momentum antara partikel fluida, yang pada gilirannya meningkatkan gaya gesekan (friksi) dan koefisien perpindahan panas konveksi.

Pada konveksi, dapat dijumpai persamaan yang disusun tanpa menggunakan dimensi dan menggabungkan beberapa variable dalam satu kelompok menjadi bilangan tak berdimensi. Bilangan Reynolds merupakan perbandingan dari gaya inertia terhadap gaya viscous dalam fluida.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inertia}}{\text{Gaya Viscous}} = \frac{\rho V \delta}{\mu} = \frac{V \delta}{\nu} \quad (2.9)$$

Pada bilangan Re yang besar, gaya inersia yang sebanding dengan densitas dan kecepatan fluida relative besar terhadap gaya *viscous*. Dengan demikian, gaya *viscous* tidak dapat mencegah fluktuasi acak dan cepat pada fluida dengan daerah turbulen. Bilangan Reynold dimana aliran menjadi turbulen disebut *critical Reynold Number*. Untuk plat datar, nilai critical Re ditentukan secara eksperimen sekitar 5×10^5 .

Bilangan prandtl merupakan ukuran ketebalan relative dari kecepatan dan lapisan batas temperature.

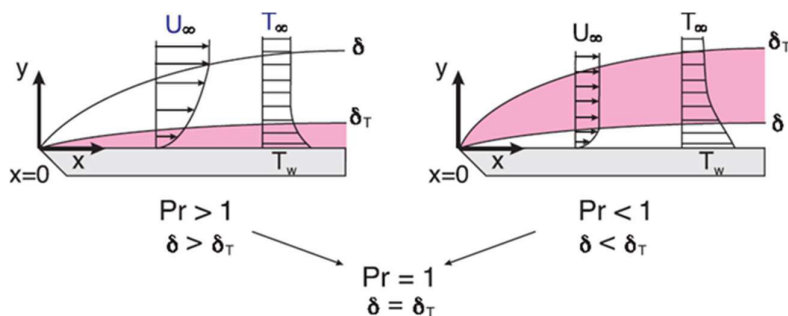
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.10)$$

Dimana,

- ρ = densitas (Kg/m^3)
- μ = Viscositas dinamik (N.s/m^2)
- k = Thermal conductivity (W/m.k)
- C_p = Kapasitas panas spesifik (J/kg.K)
- ν = Viskositas kinematic (m^2/s)
- α = Thermal diffusivitas (m^2/s)

2.2.2 Lapisan batas panas (*Thermal Boundary layer*)

Serupa dengan lapisan batas kecepatan, lapisan batas suhu dikembangkan saat fluida pada suhu tertentu mengalir di atas permukaan yang memiliki temperatur berbeda.



Gambar 2.10 Batas lapisan thermal

Ketebalan dari lapisan batas suhu δ_t didefinisikan sebagai jarak di mana:

$$\frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} = 0.99 \quad (2.11)$$

Besar relatif dari kecepatan dan lapisan batas termal dideskripsikan melalui bilangan Prandtl.

Pada fluida dengan bilangan Prandtl rendah, misalnya logam cair, panas berdifusi jauh lebih cepat dibandingkan momentum aliran (ingat $Pr = \nu / \alpha \ll 1$) dan lapisan batas kecepatan sepenuhnya terkandung di dalam lapisan batas termal. Di sisi lain, pada nilai Prandtl yang tinggi, misalnya minyak, panas berdifusi jauh lebih lambat dibandingkan momentum dan lapisan batas termal termasuk di dalam lapisan batas kecepatan.

2.2.3 Aliran diatas pelat datar

Friksi dan koefisien perpindahan panas untuk plat datar dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan massa, momentum, dan energi (baik perkiraan maupun secara numerik). Nilainya juga bisa diukur secara eksperimental. Diketahui bahwa bilangan Nusselt dapat dinyatakan sebagai:

$$Nu = \frac{hL}{k} = C Re_L^m Pr^n \quad (2.12)$$

dimana C, m, dan n adalah konstanta, dan L adalah panjang plat datar. Properties dari fluida biasanya dievaluasi pada suhu film yang didefinisikan sebagai:

$$T_L = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.13)$$

2.2.4 Laminar Flow

Koefisien friksi lokal dan bilangan Nusselt di lokasi x untuk aliran laminar di atas plat datar :

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0.6 \quad (2.14)$$

$$C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} \quad (2.15)$$

dimana x adalah jarak dari ujung depan plat dan $Re_x = \rho V_\infty x / \mu$. Koefisien friksi rata-rata dan bilangan Nusselt melalui plat isothermal untuk aliran laminar adalah:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0.6 \quad (2.16)$$

$$C_f = \frac{1.328}{Re_L^{1/2}} \quad (2.17)$$

Mengasumsikan bilangan Reynolds kritis sebesar 5×10^5 , panjang pelat x_{cr} dimana aliran laminar dapat ditentukan dari :

$$Re = 5 \times 10^5 = \frac{V_\infty x_{cr}}{\nu} \quad (2.18)$$

2.2.5 Turbulen flow

Koefisien gesekan local dan bilangan Nusselt di lokasi x untuk aliran turbulen melalui pelat datar *isothermal* adalah :

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.19)$$

$$C_f = \frac{0.0592}{Re_x^{1/5}} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.20)$$

Koefisien gesekan rata rata dan bulangan Nusselt untuk aliran turbulen melalui pelat *isothermal* adalah :

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.21)$$

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.22)$$

2.2.6 Kombinasi aliran laminar dan turbulen

Jika platnya cukup panjang untuk membuat aliran menjadi turbulen (dan tidak cukup panjang untuk mengabaikan daerah aliran laminar), kita harus menggunakan nilai rata-rata untuk koefisien friksi dan bilangan Nusselt.

$$C_f = \frac{1}{L} \left(\int_0^{x_{cr}} C_{f,x,laminar} dx + \int_{x_{cr}}^L C_{f,x,turbulen} dx \right) \quad (2.23)$$

$$h = \frac{1}{L} \left(\int_0^{x_{cr}} h_{x,Laminar} dx + \int_{x_{cr}}^L h_{x,Turbulen} dx \right) \quad (2.24)$$

Dimana bilangan Reynolds kritis diasumsikan sebesar 5×10^5 . Setelah melakukan perhitungan secara integral dan penyederhanaan, didapatkan:

$$Nu = \frac{hL}{k} = (0.037 Re_x^{\frac{4}{5}} - 871) Pr^{1/3} \quad 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.25)$$

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1742}{Re_L} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (2.26)$$

Persamaan di atas digunakan untuk kasus permukaan isothermal, namun juga dapat digunakan untuk memperkirakan pada kasus permukaan non-isothermal. Dalam kasus seperti itu, asumsikan bahwa suhu permukaan konstan pada beberapa nilai rata-rata.

Untuk pelat *isoflux* (*uniform heat flux*), bilangan Nusselt lokal untuk aliran laminar dan turbulen didapatkan dari:

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.453 Re_x^{0.5} Pr^{1/3} \quad \text{Laminer (Isoflux Plate)} \quad (2.27)$$

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.0308 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad \text{Turbulent (Isoflux Plate)} \quad (2.28)$$

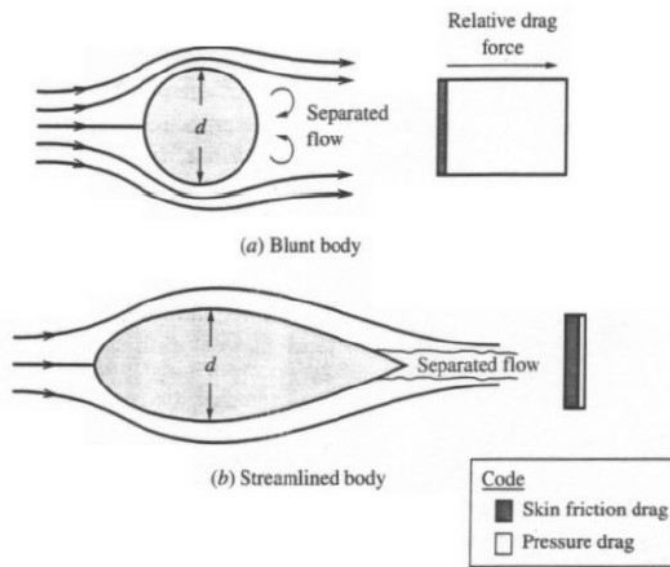
Persamaan diatas dengan catatan bahwa hubungan isoflux memberikan nilai 36% lebih tinggi untuk laminar dan 4% untuk aliran turbulen relatif terhadap case plat isothermal.

2.2.7 Aliran melalui silinder dan bola

Panjang karakteristik untuk tabung atau bola (sphere) adalah diameter luar, D , dan bilangan Reynolds didefinisikan:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (2.30)$$

Critical Reynold number untuk aliran yang melintasi permukaan bola atau silinder adalah 2×10^5 . Fluida yang melalui ke silinder (bola) akan bercabang dan melingkar, membentuk lapisan batas.



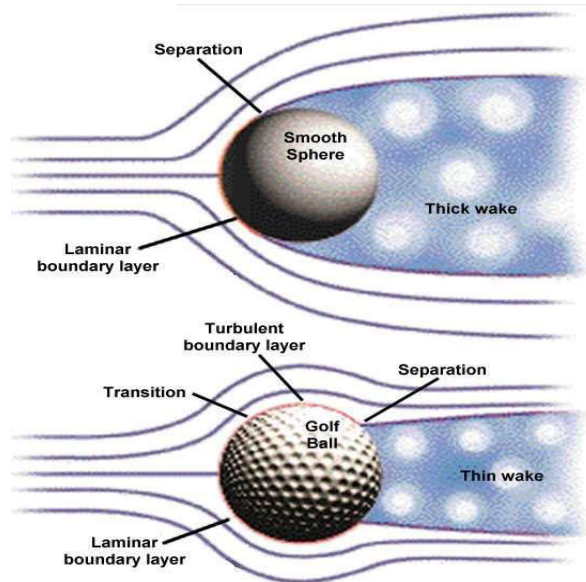
Gambar 2.11 Type pola aliran diatas bola dan streamline body serta daya Pada nilai Re rendah ($Re < 4$) fluida benar-benar menyelimuti permukaan. Pada bilangan Re yang lebih tinggi, fluida terlalu cepat untuk tetap menempel ke permukaan saat mendekati bagian atas silinder. Dengan demikian, batas lapisan terlepas dari permukaan, membentuk bagian di belakang objek. Titik ini disebut titik pemisahan. Untuk mengurangi koefisien drag, bentuk yang ramping lebih sesuai, misalnya pesawat yang dibangun menyerupai burung dan kapal selam mirip ikan, Gambar 2.11.

Dalam aliran melewati silinder atau sphere, pemisahan aliran terjadi sekitar 80° untuk aliran laminar dan 140° untuk aliran turbulen.

$$F_D = C_D A_N \frac{\rho V_\infty^2}{2} \quad (2.31)$$

Dimana A_N = Frontal Area . Frontal areal untuk silinder adalah $A_N = L \times D$ dan untuk bola $A_N = \pi D^2/4$. Gaya drag tarik yang bekerja pada objek disebabkan oleh dua efek: friksi drag (karena shear stress di permukaan) dan tekanan drag yang disebabkan perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang object.

Sebagai hasil transisi ke arus turbulen, yang memindahkan titik pemisah jauh ke bagian belakang objek, penurunan besar dalam koefisien drag terjadi. Akibatnya, permukaan bola golf sengaja dikuliti untuk menimbulkan turbulen pada bilangan Re yang lebih rendah, lihat Gambar 2.12



Gambar 2.12 Roughened golf ball reduces C_D .

Koefisien perpindahan panas rata-rata untuk aliran melalui silinder dapat ditemukan dari korelasi yang disajikan oleh Churchill dan Bernstein:

$$Nu_{silinder} = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4 Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (2.32)$$

dimana properties fluida dievaluasi pada suhu film $T_f = (T_s + T_\infty) / 2$. Untuk aliran melalui sphere, Whitaker merekomendasikan beberapa hal berikut ini:

$$Nu_{spher} = \frac{hD}{k} = 2 + [0.4 Re^{1/2} + 0.06 Re^{2/3}] Pr^{4/5} (\mu_\infty / \mu_s)^{1/4} \quad (2.33)$$

Yang berlaku untuk Reynold Number adalah $3,5 < Re < 80.000$ dan $0.7 < Pr < 380$.

Properties fluida dievaluasi pada suhu aliran bebas T_∞ , kecuali untuk μ_s yang dievaluasi pada suhu permukaan. Rata-rata bilangan Nusselt untuk aliran melalui silinder melingkar dan silinder tidak melingkar dapat ditemukan dari Tabel 10-3 buku Cengel.

Untuk mempermudah menganalisa proses yang terjadi saat pendinginan di boiler, kita dapat menggunakan bantuan perangkat lunak. Penggunaan perangkat lunak

mendapatkan hasil dari proses yang terjadi sehingga waktu optimum yang diinginkan dalam proses pendinginan dapat di simulasikan. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini dengan jenis CFD (Computational Fluid Dynamic) yaitu program Gambit dan Fluent.

Gambit merupakan singkatan dari geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit. Gambit berfungsi untuk membuat model geometrid an mendefinisikan daerah yang akan dilalui fluida serta melakukan proses meshing pada daerah tersebut. Setelah semuanya dilakukan, model tersebut siap untuk dianalisis menggunakan FLUENT. Fluent adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida dan perpindahan panas. Aliran dan perpindahan panas dari berbagai fluida dapat disimulasikan pada bentuk/geometri yang rumit. Dengan menggunakan program fluent, dapat diketahui parameter parameter aliran dan perpindahan panas yang diinginkan. Distribusi tekanan, kecepatan aliran, laju aliran massa, distribusi temperature dan pola aliran yang terjadi dapat diketahui pada tiap titik yang terdapat dalam system yang dianalisa.

2.3 Penentuan dampak dan waktu optimal

Berdasarkan kamus besar Bahasa Indonesia, salah satu definisi dampak adalah pengaruh kuat yang mendatangkan akibat (baik negative maupun positif). Sehingga dalam penelitian ini dampak dari pendinginan dengan menggunakan variable beberapa kecepatan udara adalah hasil pengukuran sifat mekanik yang turun dibawah standar sifat mekanik material T91, dalam hal ini akan menggunakan referensi ASTM A213-15a.

Pengertian optimal menurut pendapat beberapa ahli adalah sebagai berikut :

1. Optimal merupakan jumlah, derajat atau sesuatu yang paling disukai bisa dicapai dalam kondisi tertentu (Herilarium, Wordpress.com). Optimum tidak berarti maksimum, karena optimum memperhitungkan faktor faktor lain yang berpengaruh.
2. Optimal adalah berusaha untuk memaksimumkan sesuatu yang diinginkan (Sisdjiatmo, 1983. Hal 266)

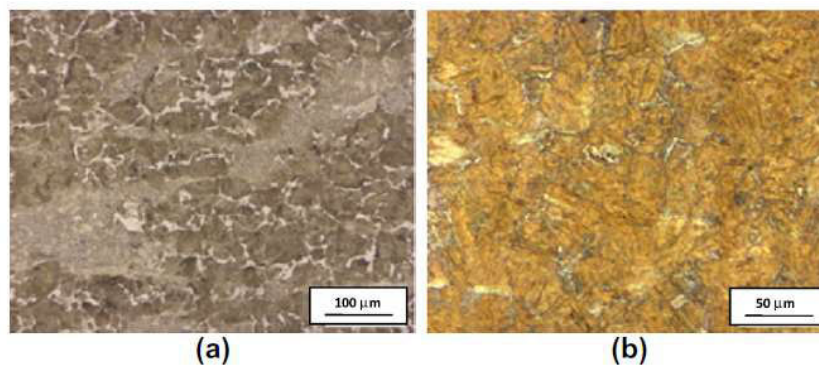
Dari beberapa pengertian optimal diatas maka waktu optimal dalam pendinginan yang dimaksud adalah waktu pendinginan tube final superheat dengan memperhatikan dampak dari sifat mekanik akibat *forced cooling* dengan beberapa kecepatan udara.

2.4 Penelitian terdahulu

Berikut beberapa penelitian terdahulu yang berhubungan dengan pendinginan material.

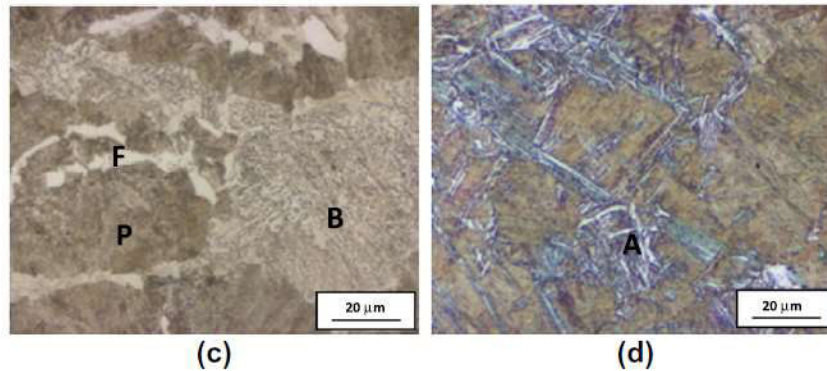
2.4.1 L. Ceschini et.al

L. Ceschini et al telah meneliti *cooling rate* pada ingot medium carbon steel yang dipanaskan pada 1200 °C dan dilakukan *hot rolled* menjadi pelat tipis 20 mm. Dengan menggunakan cooling rate 0.7 °C menghasilkan mikrostruktur dengan struktur pearlite dalam jumlah besar dan sebagian kecil *pro-eutectoid ferrite* dan *bainite* dengan ukuran grain $24 \pm 2 \mu\text{m}$.



Gambar 2.13 Struktur mikro dengan *cooling rate* 0.7 °C

Sifat mekanik yang diperoleh yaitu *hardness* $25 \pm 0.5 \text{ HRC}$, *Ultimate tensile strength* $857 \pm 26 \text{ MPa}$ dan *elongation to failure* $11 \pm 1\%$. Sedangkan dengan *cooling rate* 7.5 °C/s menghasilkan struktur mikro *martensite* dan *acicular ferrite* dengan dengan ukuran grain $17 \pm 1 \mu\text{m}$.



Gambar 2.14 Struktur mikro dengan *cooling rate* 7.5 °C

Sifat mekanik yang diperoleh yaitu *hardness* 52 ± 0.5 HRC, *Ultimate tensile strength* 1670 ± 26 MPa dan *elongation to failure* $6,2 \pm 0,3$ %.

2.4.2 D.Q Bai et al.

D.Q. Bai et al melakukan penelitian terhadap 3 microalloyed steel dengan kombinasi Mo, Nb dan B yang berbeda. Dipanaskan pada 1200 °C selama 30 menit dan didinginkan dengan *cooling rate* 1 °C, 10 °C, 30 °C dan 50 °C. *Cooling rate* yang lebih besar menghasilkan struktur mikro *bainite* yang bagus dengan *lath-like ferrite* sangat tipis dan panjang. *Cooling rate* yang lebih rendah menghasilkan struktur mikro *coarse bainite* dengan *lath-like ferrite* yang pendek dan lebar.

2.4.3 Jenan Mohammad Nagie

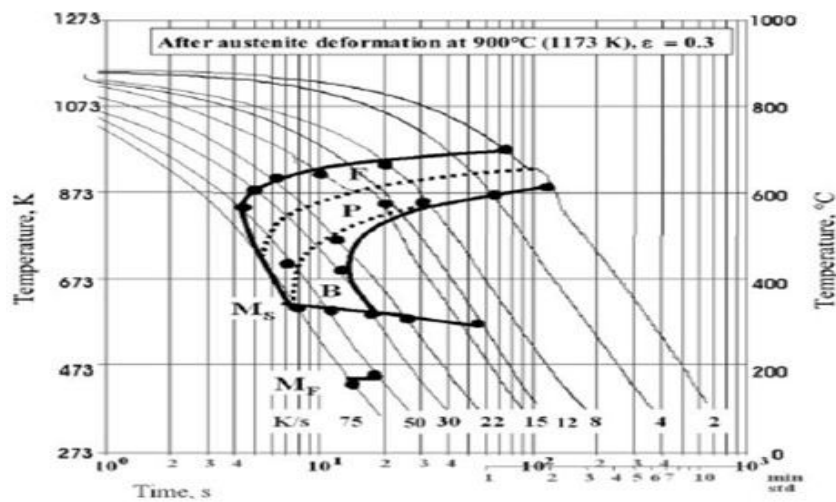
Jenan Mohammed Nagie mempelajari bahwa Sifat mekanik baja sangat berhubungan dengan struktur mikro dari baja tersebut, yang didapatkan setelah perlakuan pemanasan dan *quenching*. Secara umum hal ini dilakukan untuk mendapatkan *hardness* yang bagus, *tensile strength* dan *ductility* yang sesuai

Tabel 2.2 Sifat mekanik pada material uji

Conditions	HV Hardness (Kg/mm ²)	Torsion Strength (Kg/mm ²)	Impact Strength (Kg.m/cm ²)	Yield strength (Mpa)	Ultimate strength (Mpa)	Elongation %
(A) as received	132	67.4	11.0	492	701	20
(B) water quenched	556	87	8.6	-	885	18
(C) air cooled	210	45	43.0	505	702	11
(D) furnace cooled	155	52.5	80.3	317	496	25

2.4.4 L. Storojeva et.al

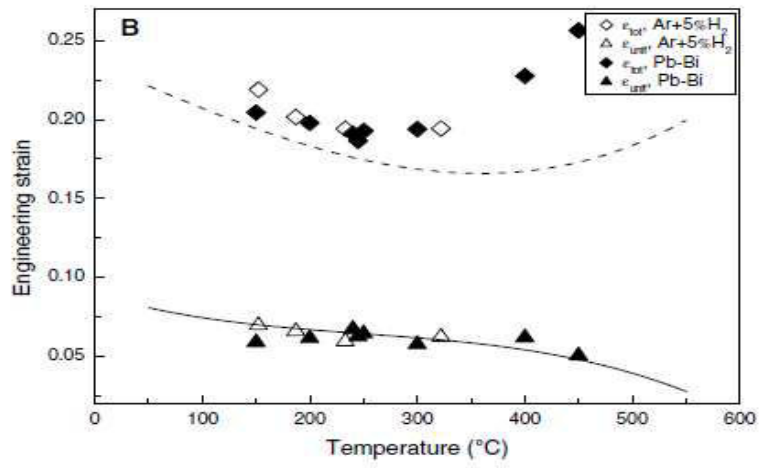
L. Storojeva et.al telah melakukan penelitian pada *ferrite-pearlite steel* dipanaskan sampai 900 °C kemudian didinginkan dengan *cooling rate* 2 - 20 °K/s kemudian dilaksanakan pengujian mikrostruktur dan kondisi ferrite untuk membuat *Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram*



Gambar 2.15 CCT Diagram setelah deformasi Austenite

2.4.5 J. Van den Bosch et al

J. Van den Bosch et al melakukan penelitian pengaruh temperature dan *strain rate* pada sifat mekanik material T91 yang diuji menggunakan larutan lead bismuth eutectid. Pengaruh temperature pada sifat ductility menghasilkan penurunan seiring dengan kenaikan temperature.



Gambar 2.16 hasil pengujian tensile test vs temperatur

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahap Tahap Penelitian

Secara garis besar metode penelitian yang dilakukan untuk analisa pengaruh kecepatan *forced cooling* terhadap struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan tube superheater *pulverized coal boiler* adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan informasi baik dari *Manual book*, jurnal, *e book* maupun hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tema tesis. Selain itu juga dilakukan dengan mencari literatur lain yang berkaitan dengan tema tesis.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan baik dari data primer maupun sekunder di PLTU UBJOM Paiton 9. Data-data ini meliputi

- a) Data desain peralatan dan *drawing*
- b) Data *performance test* saat *commissioning*
- c) Data parameter operasi

3. Melakukan Pemodelan dan Simulasi

Pemodelan *Boiler area* superheater dan simulasi menggunakan software CFD. tahap tahapan permodelan dan simulasi secara garis besar adalah *preprocessing*, *Solving* dan *Post processing*. Penelitian ini akan difokuskan pada penurunan temperatur pipa superheater.

4. Eksperimen dan pengujian

Tahap ini adalah melakukan eksperimen pemanasan sesuai dengan temperatur operasi sebelum shutdown kemudian melakukan pendinginan dengan temperatur terkontrol menggunakan ash furnace laboratorium. Dilanjutkan dengan pengujian struktur mikro, kekuatan tarik dan kekerasan.

5. Penyusunan Laporan

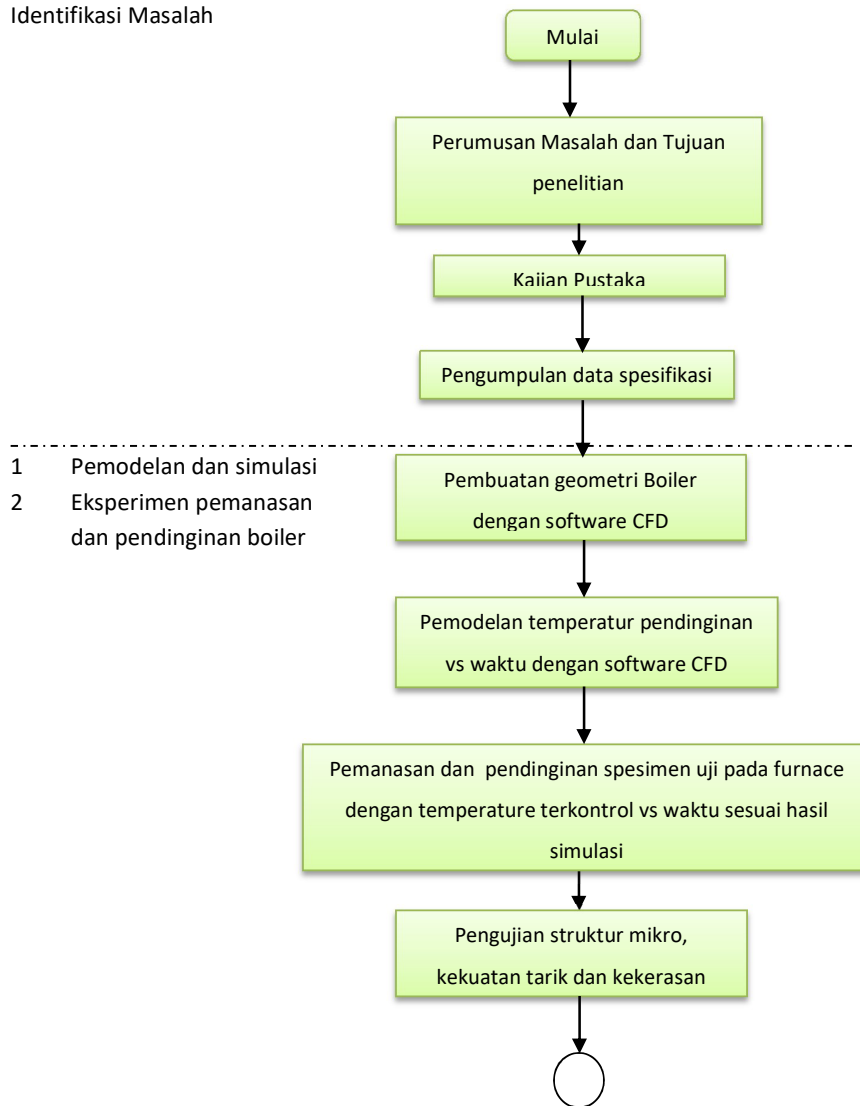
Tahap ini adalah tahap penulisan laporan akhir tesis yang berisi pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hipotesa, analisa dan

pembahasan, serta kesimpulan dan saran dari penelitian yang sudah dilakukan.

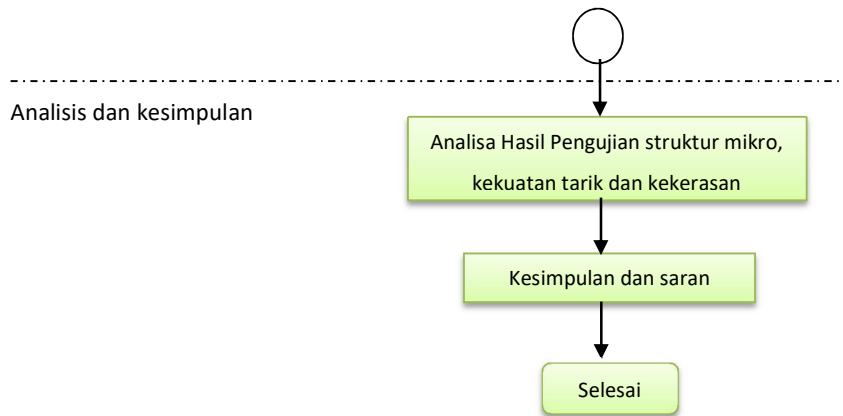
3.2 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar dan ringkas penulis merumuskan metode penelitian ini seperti terlihat pada diagram alir gambar 3.1 berikut:

Identifikasi Masalah



- 1 Pemodelan dan simulasi
- 2 Eksperimen pemanasan dan pendinginan boiler



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

3.3 Pengumpulan data operasi

Pengumpulan data spesifikasi unit diperlukan untuk mengetahui jenis material dan spesifikasinya, geometri Boiler untuk permodelan serta beberapa spesifikasi peralatan untuk menunjang kebutuhan eksperimen dan pembuatan pemodelan.

- Jenis material

Jenis material tube superheat adalah SA213 T91, dengan spesifikasi sesuai standar ASTM A213 sebagai berikut :

Tabel 3.1 Batasan komposisi kimia material T91

Unsur	Kadar (%)
Karbon (C)	0.07 – 0.14
Manganese (Mn)	0.30 – 0.60
Phosphorus (P)	0.020
Sulfur (S)	0.010
Silicon (Si)	0.20 – 0.50
Nickel	0.40
Chromium (Cr)	8.0 – 9.5
Molybdenum (Mo)	0.85 – 1.05
Vanadium	0.18 – 0.25

Boron	-
Niobium	0.06 – 0.10
Nitrogen	0.030 – 0.070
Alumunium	0.02
Tungsten	-
Other Element	Ti = 0.01 Zr = 0.01

- Sifat mekanik

Sifat mekanik untuk material T91 berdasarkan standar ASTM A213M – 15a sesuai tabel 3.2

Tabel 3.2 Sifat Mekanik material T91 berdasarkan standar ASTM A213M – 15a

Sifat Mekanik	Nilai	Satuan
Kekuatan Tarik	Min 585	MPa
Yield Strength	Min 415	MPa
Elongasi	Min 20	%
Kekerasan	196 – 265	HV

- Spesifikasi Boiler

Data data spesifikasi boiler untk penelitian ini didasarkan pada *manual book boiler* PLTU Paiton 9 seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.3

Tabel 3.3 Spesifikasi Boiler Paiton 9

No	Nama Peralatan	Parameter
1	<i>Furnace size (width × height × depth)</i>	20193×20052×64985mm
2	<i>Roof elevation</i>	88600mm
3	<i>Furnace type</i>	<i>Membrane, gas-tight, single-furnace</i>
4	<i>Calculated cross-sectional area of the furnace design</i>	404.91m ²

5	<i>Furnace volume heat load</i>	71.9 kW/m ³
6	<i>Furnace design pressure</i>	180 Bar
7	<i>Material</i>	12Cr1MoVG/SA-213 T91
8	<i>Outlet working substance temperature</i>	541°C
9	<i>Maximum calculated working substance temperature</i>	541°C
10	<i>Outlet metal wall temperature / maximum metal wall temperature</i>	582/603°C
11	<i>Number of parallel connection tubes</i>	104×6 piece
13	<i>Superheater system's water volume</i>	240m ³

- Spesifikasi *Force draft fan* dan *Induce draft fan*

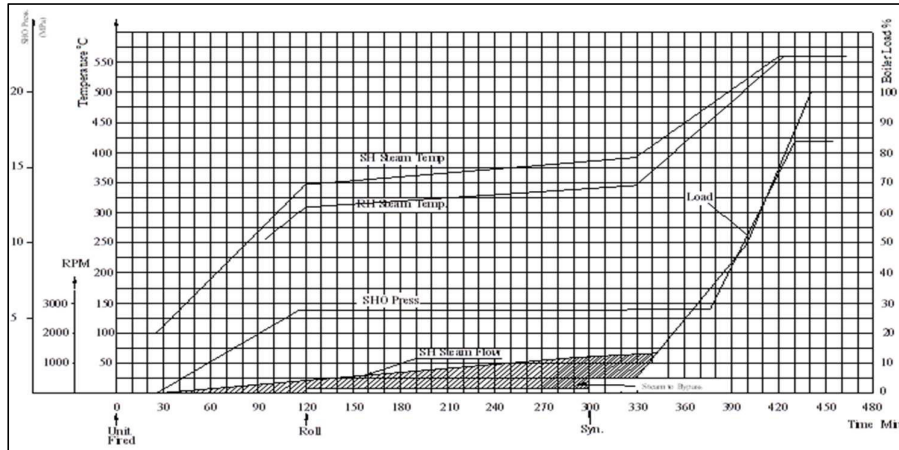
Berdasarkan *manual book* berikut spesifikasi dari *force draft fan* dan *Induce draft fan* seperti yang ditunjukkan pada table 3.4

Tabel 3.4 spesifikasi dari *force draft fan* dan *Induce draft fan*

Parameter	Kriteria		Nilai
<i>Force Draft Fan</i>			
Type	Adjustable movable blade axial flow type	<i>Quantity</i>	2 sets
Model	FAF26.6-13.3-1	<i>Air volume (TB /BMCR/TMCR)</i>	.55/207.62/164.1 6m ³ /s
<i>Induce Draft Fan</i>			
Type	Adjustable static blade axial flow type	<i>Quantity</i>	2 set
Model	AN40(13)	<i>Air quantity (TB/BMCR/TMCR)</i>	678.1/557.4/529 .6 m ³ /s

- Kurva start up

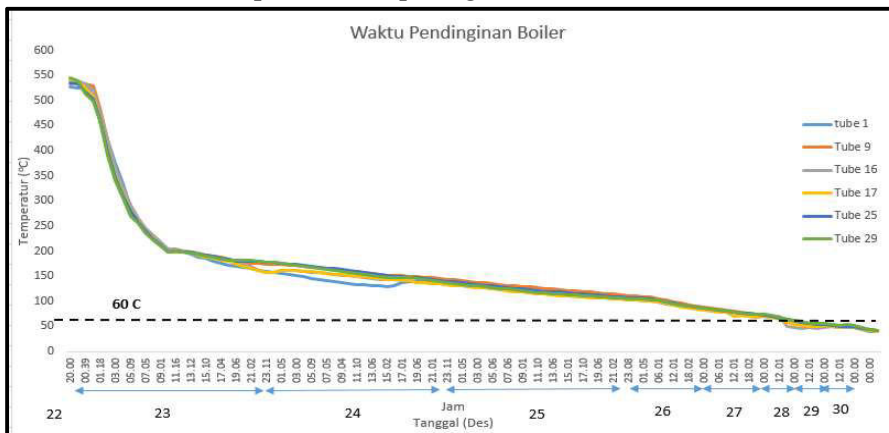
Data data laju start up boiler digunakan untuk mengetahui laju kenaikan temperatur saat start up yang akan digunakan sebagai dasar untuk pemanasan material T91 seperti gambar 3.2



Gambar 3.2 grafik kenaikan temperatur steam pada saat start up boiler

- Waktu pendingin boiler area final Superheater dengan sistem pendinginan alami.

Berdasarkan data yang didapatkan pada saat unit shutdown tanggal 23 Desember 2017 didapatkan data pada gambar 3.3



Gambar 3.3 grafik penurunan *metal temperature superheater* saat shutdown boiler dengan pendinginan secara *natural cooling*

3.4 Pemodelan dan simulasi

Penelitian ini akan melakukan pemodelan dan simulasi pada Boiler area superheater PLTU Paiton 9 mensimulasikan pendingin boiler dengan metode *natural cooling* dan *forced boiler*. Simulasi ini diharapkan dapat

mengetahui laju penurunan temperatur saat shutdown boiler dengan pendingin boiler secara *forced cooling*. Validasi model dan simulasi dilakukan terhadap data operasi ketika shutdown boiler dengan pendinginan *natural*.

3.4.1 Tahap *Preprocessing*

Tahap awal dari permodelan menggunakan *software CFD* adalah proses *Pre-processing*. Pada tahap ini akan dilakukan pembuatan geometri dari boiler area superheater, pembuatan *meshing* dan penentuan domain.

Pembuatan geometri menggunakan *software CFD*. Gambar teknis dapat dilihat pada gambar 3.2.



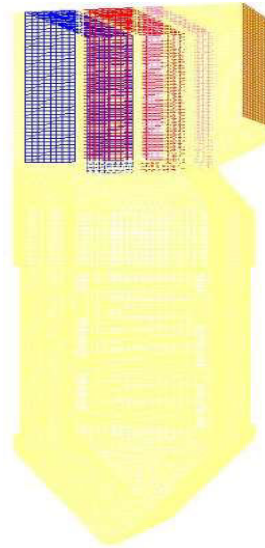
Gambar 3.4 Gambar teknis Boiler PLTU Paiton 9

3.4.2 Domain Permodelan

Domain dari pemodelan ini secara garis besar terdiri atas 3 bagian yaitu : *inlet boiler*, *superheater* dan *outlet boiler*. *Velocity inlet* didefinisikan pada *inlet duct*. *Heat Exchanger* dimodelkan sebagai *porous medium*. *Heat exchanger* akan dibagi menjadi 3 sesuai dengan jumlah baris pada Boiler. Outlet akan didefinisikan sebagai outlet pressure.

3.4.3 Meshing

Aliran udara didalam *Boiler* dibagi menjadi elemen elemen kecil (*meshing*) untuk dimodelkan dalam software CFD. *Meshing* dilakukan bertahap dari garis ke volume menggunakan *hexahedral map meshing*. Visual *meshing* dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.5 Meshing geometri

3.4.4 Tahap *Processing*

Tahap *processing* adalah tahap simulasi dari model yang telah dibuat. *Processing* dilakukan menggunakan software CFD. tahap *processing* terdiri atas beberapa proses antara lain : Model, Material, *CellZone Condition*, *Boundary Condition*, *Solution*, *Initialize*.

Rencana model yang akan digunakan dalam Ansys fluent secara umum dapat digambarkan sebagai berikut :

Tabel 3.5 Nilai Parameter Model

Model	Nilai	Keterangan
<i>Multiphase</i>	<i>Off</i>	Fluida kerja adalah udara yang dihisap dari FDF menuju ke boiler
<i>Energy Equation</i>	<i>On</i>	Penelitian melibatkan perpindahan panas antara pipa superheat ke udara
<i>Viscous</i>	<i>standard k-ε dengan standard wall function</i>	Untuk aliran <i>turbulen</i> , sesuai penelitian Henkes dan Hoogendoorn dan <i>Ansys Fluent Theory Guide</i>
<i>Radiation</i>	<i>Off</i>	Pengaruh radiasi dianggap kecil
<i>Heat Exchanger</i>	<i>off</i>	Unit dalam kondisi shutdown, sehingga aliran steam melewati pipa superheater 0
<i>Species</i>	<i>Off</i>	Tidak ada proses pembakaran atau reaksi kimia yang dibawa oleh fluida.
<i>Discrete phase</i>	<i>Off</i>	Tidak ada injeksi material ke aliran udara
<i>Solidification & melting</i>	<i>Off</i>	
<i>Acoustic</i>	<i>Off</i>	
<i>Eulerian wall film</i>	<i>Off</i>	

Material yang digunakan pada model ini adalah udara dengan properti sebagai berikut :

Tabel 3.6 Properti udara pada inlet boiler

Beban Pembangkit	100% MCR
<i>Average Temperatur</i> ^o C	32
<i>Density (kg/m³)</i>	1.1572
<i>Specific Heat (J/kg.K)</i>	1006,5
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	0,0265
<i>Dynamic Viscosity (kg/m.s)</i>	1.8774 x 10 ⁻⁵

Sumber:<http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>

Boundary condition adalah batasan nilai dan kondisi yang diberikan pada domain model agar simulasi yang dijalankan sesuai dengan kondisi aktual. *Boundary condition* pada model yang dibuat antara lain : *inlet* diberikan nilai *velocity inlet* dan *temperatur inlet*. Sedangkan *outlet duct* diberi batasan sebagai *pressure outlet*.

3.4.5 Tahap *Post Processing*

Tahap ini menampilkan data hasil simulasi agar mudah untuk dianalisa sesuai dengan tujuan penelitian. Penelitian ini direncanakan akan menampilkan data laju penurunan temperatur terhadap waktu pada beberapa metode pendinginan boiler.

3.4.6 Rancangan Simulasi Numerik

Simulasi numerik yang dilakukan direncanakan menggunakan data penurunan temperatur saat shutdown dengan pendinginan secara natural. Data laju penurunan temperatur akan dibandingkan dengan data actual penurunan temperatur saat shutdown boiler dengan menggunakan metode pendinginan yang sama. Kemudian akan disimulasikan metode pendinginan boiler dengan metode forced cooling menggunakan kapasitas FD Fan 20% dan 40%.

Rancangan simulasi yang akan digunakan pada penelitian secara umum dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 3.7 Rancangan Simulasi Numerik

Parameter	Variasi	Nilai
Pendinginan Boiler	<ul style="list-style-type: none"> - Natural Cooling - Forced cooling 	<ul style="list-style-type: none"> - Kecepatan udara 0, inlet menggunakan pressure inlet - Kecepatan udara sesuai dengan kapasitas FD Fan 20% dan 40%

Parameter output yang direncanakan untuk didapat adalah laju penurunan temperatur dari temperatur metal saat shutdown boiler 540 °C sampai dengan 60 °C

3.5 Eksperimen pendinginan boiler dan pengujian material

3.5.1 Eksperimen pemanasan dan pendinginan boiler

Dalam eksperimen ini akan dibagi menjadi 2, yaitu proses pemanasan & force cooling, dan proses pengujian material.

1. Material

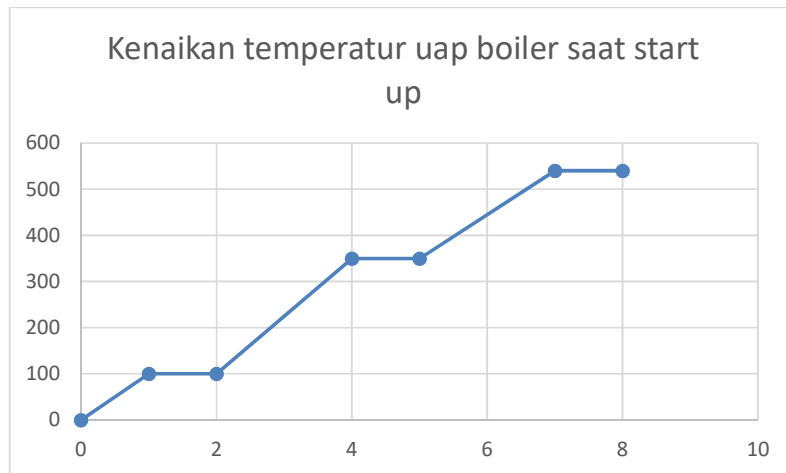
Material tube final superheater akan mengambil dari unit. Spesimen uji menggunakan material tersebut dengan panjang 10 cm dan 30 cm.

2. Metode pemanasan & *forced cooling*

- a. pengukuran panjang material uji menggunakan sketmat (Jangka Sorong)
- b. 10 buah Sample tube superheater dengan panjang 10 cm dan 4 sample dengan panjang 30 cm . dengan rincian sebagai berikut:
 - 1 Buah sample ukuran 10 cm dan 30 cm tidak mengalami perlakuan panas dan pendinginan disebut sebagai blanko.
 - 3 buah sample ukuran 10 cm dan 1 buah sample ukuran 30 cm mengalami pemanasan dan pendinginan pada *ash furnace*

dengan temperatur tercontrol sesuai grafik penurunan temperatur aktual.

- 3 buah sample ukuran 10 cm dan 1 buah sample ukuran 30 cm mengalami pemanasan dan pendinginan pada *ash furnace* dengan temperatur tercontrol sesuai grafik hasil simulasi untuk metode forced cooling dengan kapasitas *FD Fan* 20%.
 - 3 buah sample ukuran 10 cm dan 1 buah sample ukuran 30 cm mengalami pemanasan dan pendinginan pada *ash furnace* dengan temperatur tercontrol sesuai grafik hasil simulasi untuk metode forced cooling dengan kapasitas *FD Fan* 40%.
- c. akan dipanaskan menggunakan Muffle furnace laboratorium sampai dengan suhu 540 °C dan ditahan pada suhu tersebut selama 1 jam untuk pemerataan temperatur.



Gambar 3.6 Grafik kenaikan temperatur uap superheat boiler saat start up.

- d. Melaksanakan eksperimen pada ke – 3 jenis bahan uji

Tabel 3.8 eksperimen pemanasan dan pendinginan pada 3 jenis bahan uji

4 Sample ke – 1	Didinginkan secara natural
4 Sample ke – 2	Didinginkan dengan metode <i>forced cooling</i> dengan temperatur terkontrol pada <i>Ash Furnace</i> laboratorium sesuai hasil

	simulasi <i>Fluent</i> (dengan kapasitas 20% <i>FD Fan</i>)
4 Sample ke – 3	Didinginkan dengan metode <i>forced cooling</i> dengan temperatur terkontrol pada <i>Ash Furnace</i> laboratorium sesuai hasil simulasi <i>Fluent</i> (dengan kapasitas 40% <i>FD Fan</i>)



Gambar 3.7 Peralatan *Ash Furnace* laboratorium

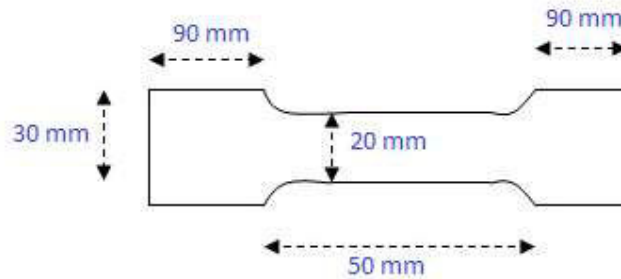
3.5.2 Pengujian mikrostruktur dan sifat mekanik material

1. Preparasi Sample untuk pengujian struktur mikro
Sample dipotong dengan ukuran 0.5 cm x 0.5 cm x 0.5 cm , kemudian dilakukan polishing dan di etsa menggunakan Nital (1-5 ml HNO₃ didalam 99 – 95 ml ethanol 95%) dipreparasi sesuai dengan metode ASTM E3.
2. Pengujian struktur mikro dengan Scanning Elektron Microscopy (SEM) type JEOL JSM 6510 – LA



Gambar 3.8 Peralatan Uji SEM

3. Pengujian kekerasan menggunakan perangkat uji kekerasan Rockwell B dengan beban 100 kgf dan indentor bola pejal diameter 1/16
4. Pengujian Tensile test (Uji Tarik) dilaksanakan menggunakan mesin uji tarik. Dengan pembuatan spesimen uji seperti pada gambar 3.9 :



Gambar 3.9 bentuk spesimen Uji kekuatan tarik

3.6 Analisis & kesimpulan

Interpretasi dilakukan berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh dari hasil pengujian struktur mikro, uji kekuatan Tarik dan uji kekerasan setelah dilakukan perlakuan pemanasan sampai temperatur 540 °C dan dilakukan pendinginan sesuai dengan laju penurunan temperatur berdasarkan data laju penurunan temperatur aktual untuk pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* dan berdasarkan hasil dari simulasi pada *software CFD* untuk pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% dan 40%. Dari ketiga hasil tersebut akan dilakukan analisa terhadap struktur mikro yang dihasilkan terhadap variasi metode pendinginan boiler serta hasil pengujian sifat mekanik yang didapatkan yaitu kekuatan tarik dan kekerasan.

Hasil dari pemodelan dan pengujian ini dapat digunakan oleh Perusahaan pembangkit listrik PLTU Paiton 9 untuk mereview Instruksi kerja shutdown Boiler bila dibutuhkan *forced cooling* untuk mempercepat waktu pendinginan Boiler.

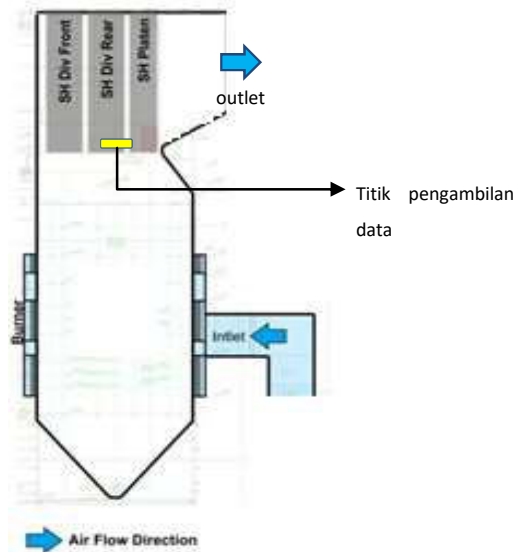
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi numerik pendinginan boiler menggunakan metode *natural cooling* dan *forced cooling* serta analisa hasil uji fisik material. Simulasi numerik dilakukan untuk mendapatkan pendinginan material superheat dari temperatur saat shutdown 540 °C hingga mencapai temperatur 60 °C. Data hasil simulasi yang dibahas adalah data simulasi penurunan temperatur terhadap waktu pada material superheater, sedangkan data hasil pengujian fisik material yang dibahas adalah struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik.

4.1. Hasil simulasi numerik

Sebelum melakukan simulasi numerik untuk pendinginan *forced cooling* dengan kapasitas FD Fan 20% dan 40%, maka dilakukan validasi terhadap hasil simulasi numerik untuk pendinginan *natural cooling*. Dimana hasil waktu pendinginan akan dibandingkan dengan waktu pendinginan aktual saat shutdown boiler. Posisi pengambilan data temperatur dapat dilihat pada gambar berikut :

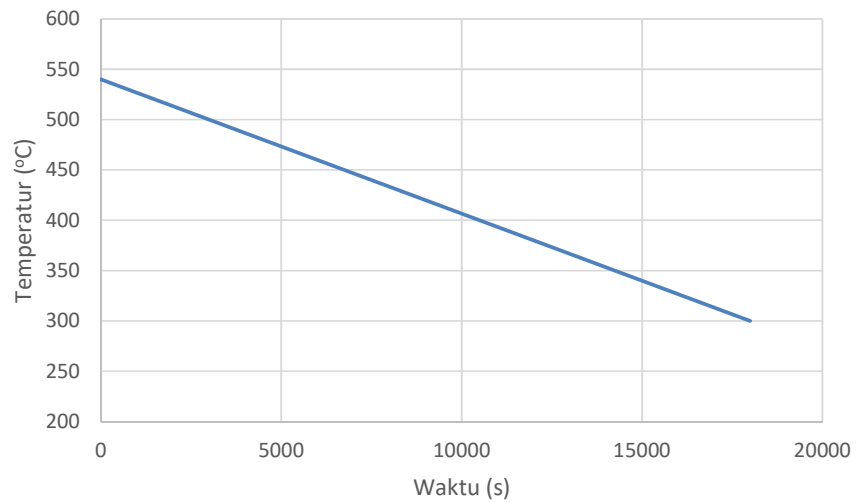


Gambar 4.1 Posisi pengambilan data temperatur pada boiler

Data temperatur yang didapatkan kemudian dibandingkan dalam bentuk grafik dan dihitung nilai error yang terjadi. Pengambilan data temperatur

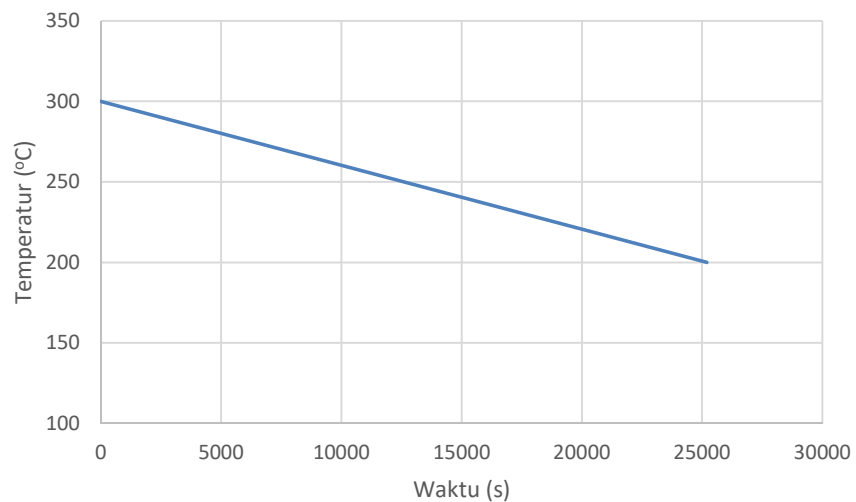
dilakukan pada jumlah iterasi 13500 dengan nilai yang paling mendekati data operasi aktual. Untuk penurunan temperatur dibagi dalam 4 tahapan, yaitu :

a. Penurunan temperatur dari Suhu 540 °C - 300 °C



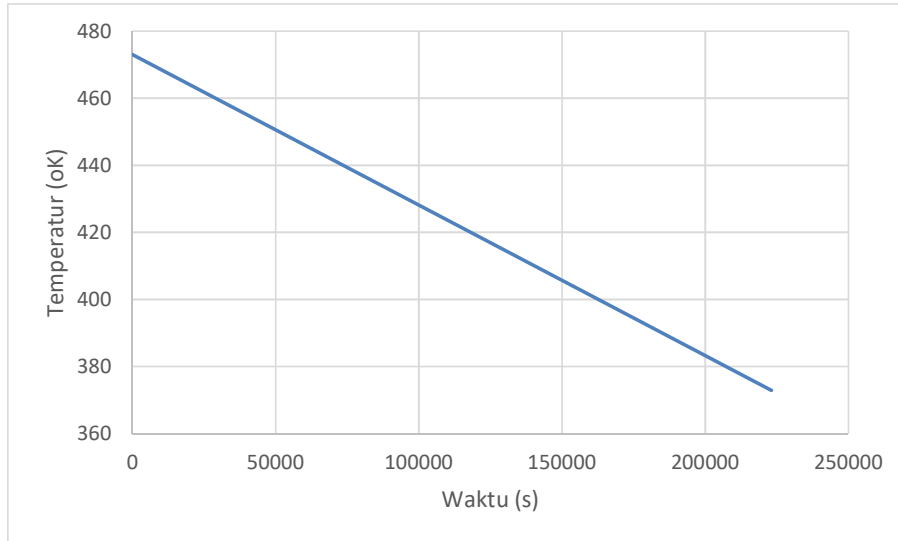
Gambar 4.2 Grafik penurunan temperatur 540 °C - 300 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling

b. Penurunan temperatur dari Suhu 300 °C s.d 200 °C



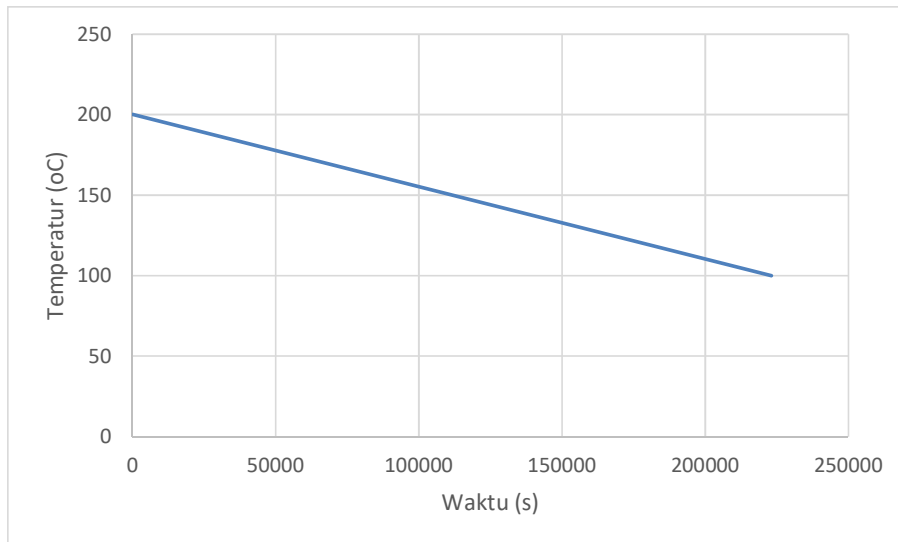
Gambar 4.3 Grafik penurunan temperatur 300 °C s.d 200 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling

c. Penurunan temperatur dari Suhu 200 °C s.d 100 °C.



Gambar 4.4 Grafik penurunan temperatur 473 °K - 373 °K hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling

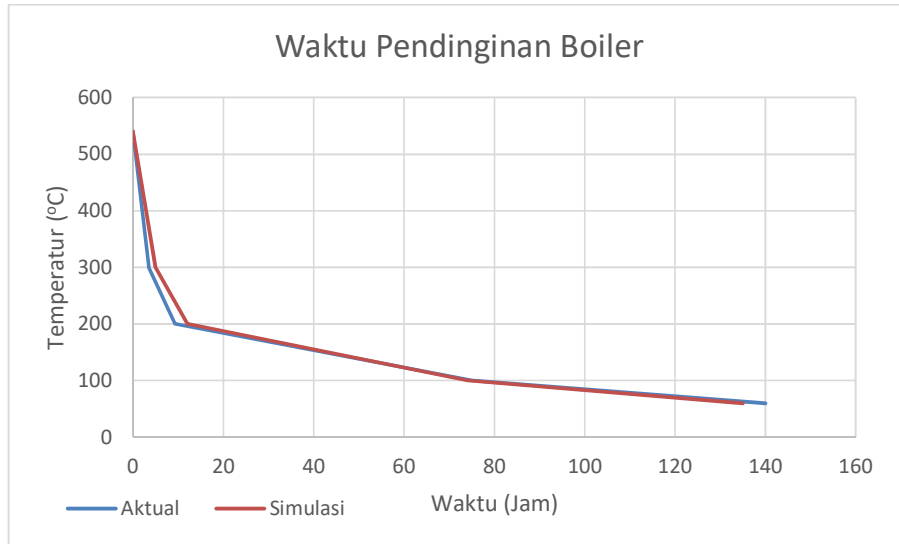
d. Penurunan temperatur dari Suhu 100 °C s.d 60 °C.



Gambar 4.5 Grafik penurunan temperatur 100 °C s.d 60 °C hasil simulasi pada pipa superheater dengan pendinginan natural cooling

Dari gambar 4.2 – 4.5 dibuat sebuah grafik penurunan temperatur hasil simulasi menggunakan software CFD dan dilakukan perbandingan dengan penurunan

temperatur aktual saat shutdown boiler dengan pendinginan secara natural seperti gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik perbandingan temperatur hasil simulasi dan data operasi saat shutdown boiler dengan pendinginan secara natural

Dari grafik perbandingan temperatur tersebut dapat diketahui bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mendinginkan tube superheater dari temperature 540 °C sampai 60 °C adalah 140 jam. Sedangkan hasil dari simulasi waktu yang dibutuhkan adalah 135 jam. Sehingga hasil simulasi mempunyai penurunan temperatur hampir mendekati kondisi aktual dengan *error* terbesar adalah -3.47 %. Dengan penentuan batas error lebih kecil dari $\pm 5\%$ maka proses simulasi ini dapat digunakan sebagai dasar proses simulasi selanjutnya, yaitu simulasi mendapatkan waktu pendinginan dengan forced cooling menggunakan FD Fan dengan kapasitas 20% dan 40%

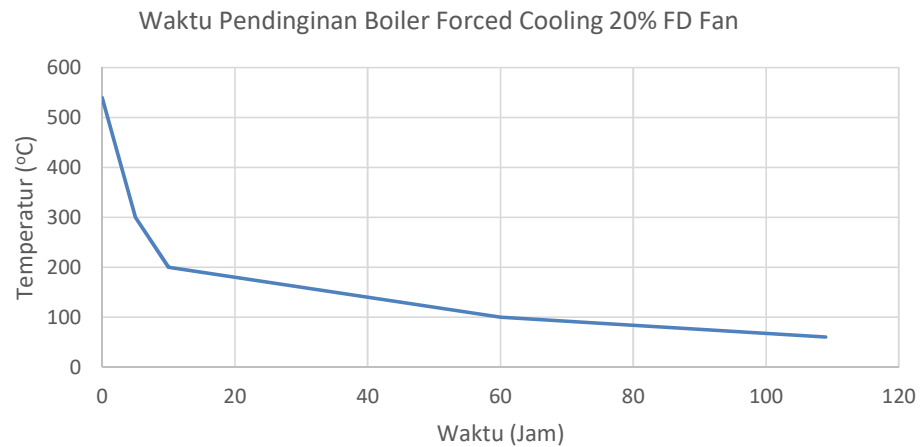
4.1.1. Hasil simulasi numerik untuk pendinginan Forced Cooling kapasitas 20% dan 40%

Dari permodelan yang telah dibuat untuk pendinginan secara natural, dijadikan dasar untuk simulasi waktu pendinginan yang dibutuhkan pendinginan boiler dengan metode forced cooling dengan kapasitas FD Fan 20% dan 40%. Pendinginan *forced cooling* dilakukan dengan mengoperasikan *FD Fan* dan *ID Fan*. Hasil aliran udara *FD fan* dihembuskan melalui *secondary air*. Adapun data kecepatan pada *secondary air* sebagai berikut:

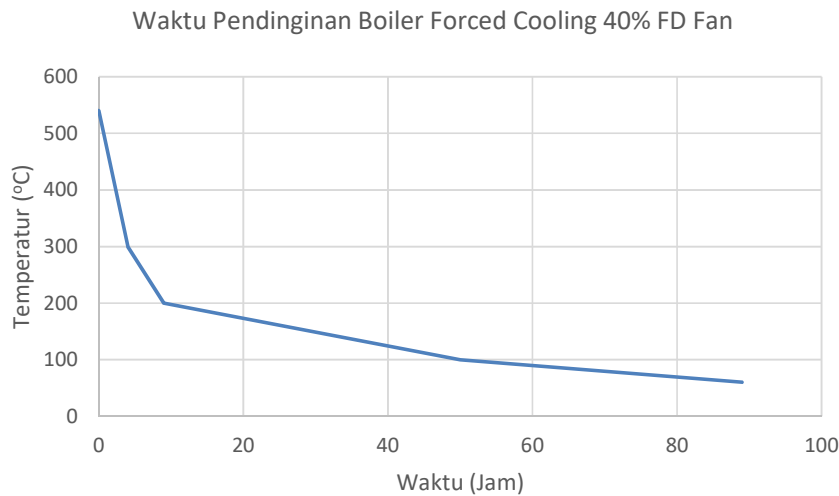
Tabel 4.1 Parameter Operasi Boiler PLTU Paiton 9

Parameter Operasi	Nilai	Satuan
FD Fan Total Air Flow	1883,00	Ton/jam
Luas Penampang Secondary Air	0,443	m ²
Jumlah Secondary air	16	Buah
Temperatur ambient rata rata	32	°C
Density (ρ)	1,1572	(kg/m ³)
Kecepatan (v) udara pada secondary air	64,46	(m/s)
Kecepatan (v) udara FD Fan 20%	12,89	(m/s)
Kecepatan (v) udara FD Fan 40%	25,79	(m/s)

Dari hasil simulasi didapatkan waktu penurunan temperatur boiler pada dengan *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% dan 40% seperti gambar 4.7 dan 4.8

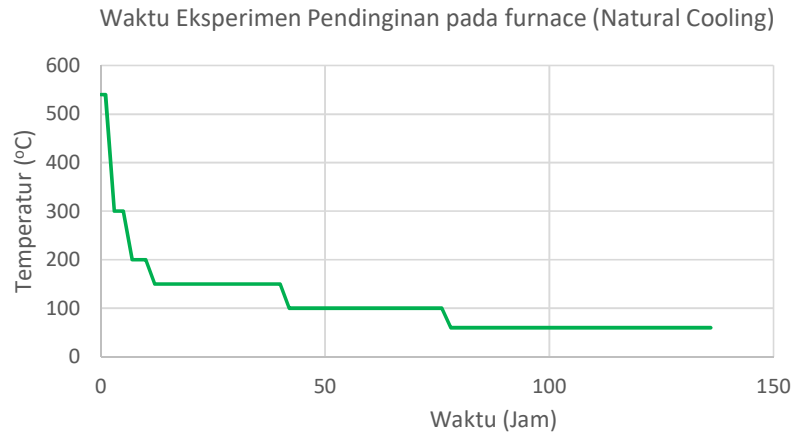


Gambar 4.7 Grafik hasil simulasi penurunan temperatur pipa superheat boiler dengan pendinginan secara *force cooling* menggunakan *FD Fan* kapasitas 20%

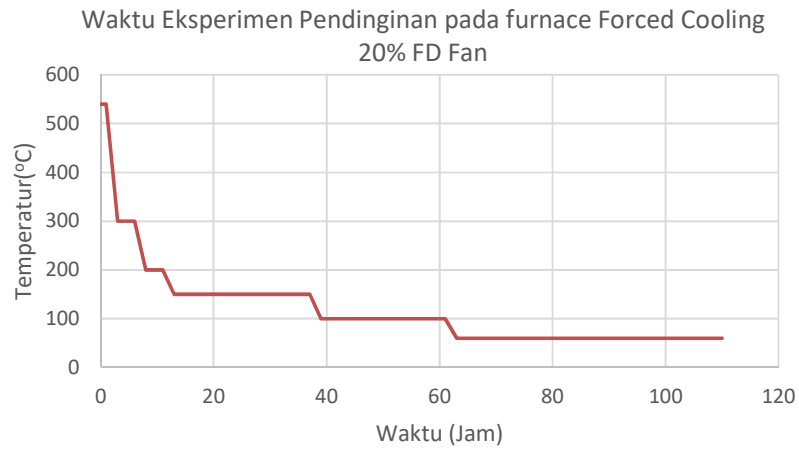


Gambar 4.8 Grafik hasil simulasi penurunan temperatur pipa superheat boiler dengan pendinginan secara *forced cooling* menggunakan *FD Fan* kapasitas 40%

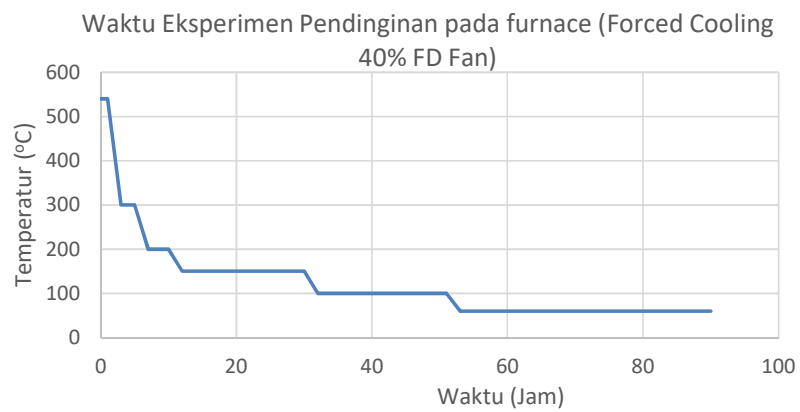
Dari hasil simulasi waktu pendinginan boiler diperoleh hasil bahwa dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan* 20% didapatkan waktu penurunan temperatur dari 540°C s.d 60 °C dibutuhkan waktu 109 jam. Sedangkan dengan kapasitas *FD Fan* 40% dibutuhkan waktu 89 Jam. waktu penurunan temperatur yang dihasilkan dijadikan dasar dalam eksperimen untuk pendinginan *forced cooling* pada *ash furnace* dengan temperature terkontrol. Sedangkan untuk pendinginan boiler metode *natural cooling*. Grafik pendinginan menggunakan *ash furnace* laboratorium dengan *natural cooling* , *forced cooling* 20% *FD Fan* dan 40 % *FD Fan* dapat dilihat pada gambar 4.9, 4.10 dan 4.11 :



Gambar 4.9 Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk natural cooling



Gambar 4.10 Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk forced cooling dengan kapasitas FD Fan 20%



Gambar 4.11 Grafik waktu pendinginan pada ash furnace untuk forced cooling dengan kapasitas FD Fan 40%

Berdasarkan hasil eksperimen, cooling rate pendinginan untuk dengan metode natural cooling, forced cooling 20% FD Fan dan Forced cooling 40% FD Fan dapat dilihat pada tabel 4.2 :

Tabel 4.2 *Cooling rate Natural Cooling, Forced Cooling 20% FD Fan dan Forced Cooling 40% FD Fan.*

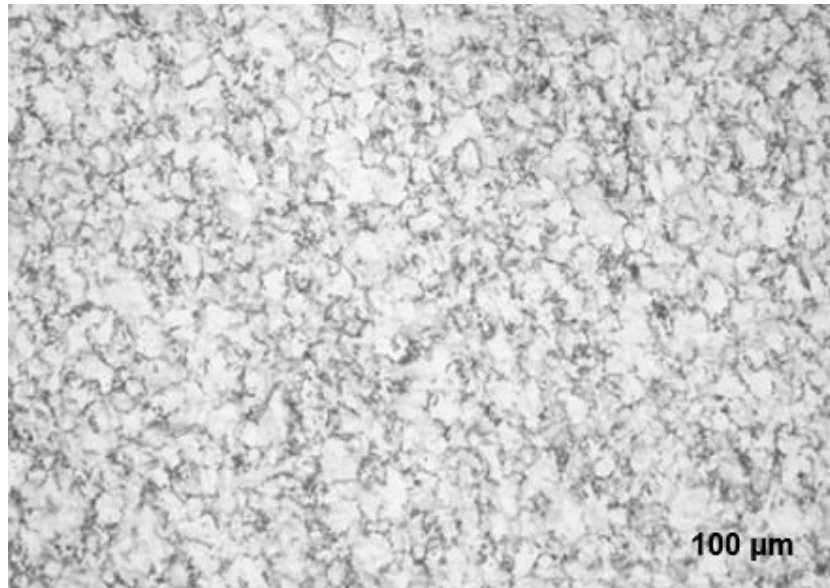
Metode Pendinginan	Cooling Rate (°C/Jam)	Cooling Rate (°C/detik)
<i>Natural Cooling</i>	3,43	0,0009524
<i>Forced Cooling 20% FD Fan</i>	4,40	0,0012232
<i>Forced Cooling 40% FD Fan</i>	5,39	0,0014981

Berdasarkan tabel 4.2 cooling rate terendah pada pendinginan dengan metode natural cooling yaitu 3,43 °C/Jam dan cooling rate tertinggi pada pendinginan dengan metode forced cooling dengan kapasitas FD Fan 40% yaitu 5,39 °C/jam

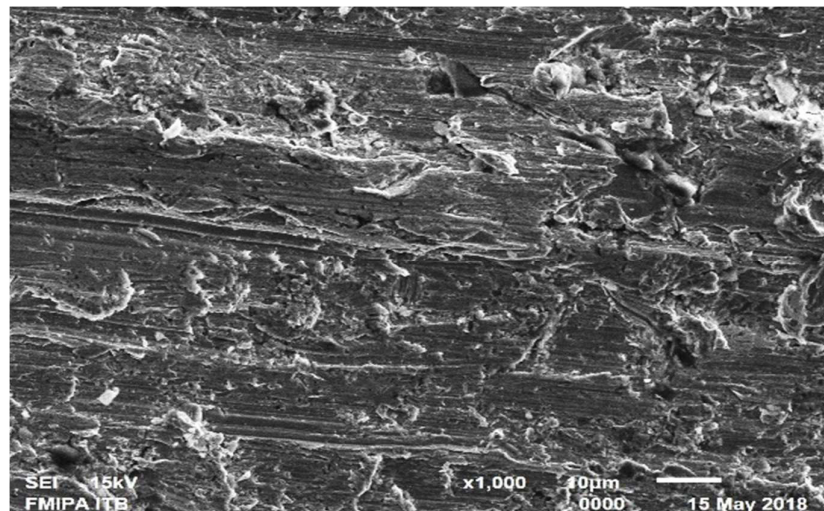
4.2. Hasil dan Analisa data pengujian Mikrostruktur

Logam T91 merupakan logam yang tahan pada temperatur tinggi dengan tipe *ferritic/martensitik*. Logam ini memiliki kekuatan thermal yang tinggi dan juga nilai *ductility* yang bagus, serta ketahanan terhadap oksidasi dan korosi. Selain itu logam ini juga memiliki ketahanan mulur (*creep*) yang baik pada temperature tinggi. Sehingga logam ini banyak digunakan pada area superheater, pemanas dan pipa tahan panas pada pembangkit listrik. [15]

Hasil perlakuan pipa T91 dengan pemanasan pada suhu 540 °C kemudian diikuti dengan pendinginan dengan tipe *natural cooling*, menghasilkan struktur mikro seperti pada gambar 4.12.



(a)



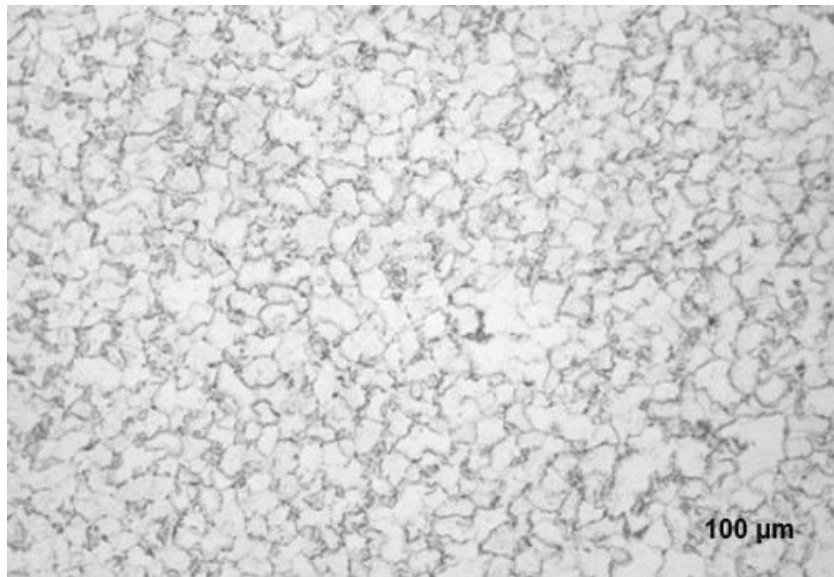
(b)

Gambar 4.12 Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan natural dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x (b)

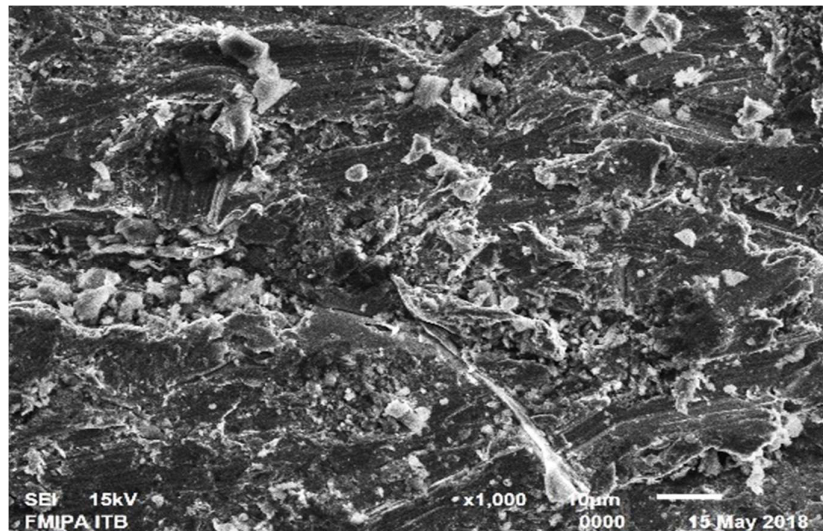
Perlakuan pemanasan dan pendinginan dengan *natural cooling* menghasilkan struktur mikro *ferrite* dan *Pearlite* dengan ukuran grain 3.37 μm . *ferrite* merupakan larutan padat dari karbon didalam besi murni fasa ini terjadi dibawah temperature 912 $^{\circ}\text{C}$ serta mempunyai sifat magnetis dan lunak. Ciri khas dari *ferrite* adalah warna struktur mikro yang terang. *Pearlite* merupakan campuran *eutectoid* dari *ferrite* dan *cementite*. Fase ini terjadi dibawah

temperatur kritis 727 °C serta mempunyai sifat lebih keras dan lebih kuat dari pada *ferrite*, tetapi kurang ulet dan magnetis [11].

Hasil perlakuan pipa T91 dengan pemanasan pada suhu 540 °C kemudian diikuti dengan pendinginan dengan tipe *forced cooling* dengan kapasitas 20% FD Fan seperti pada gambar 4.13.



(a)

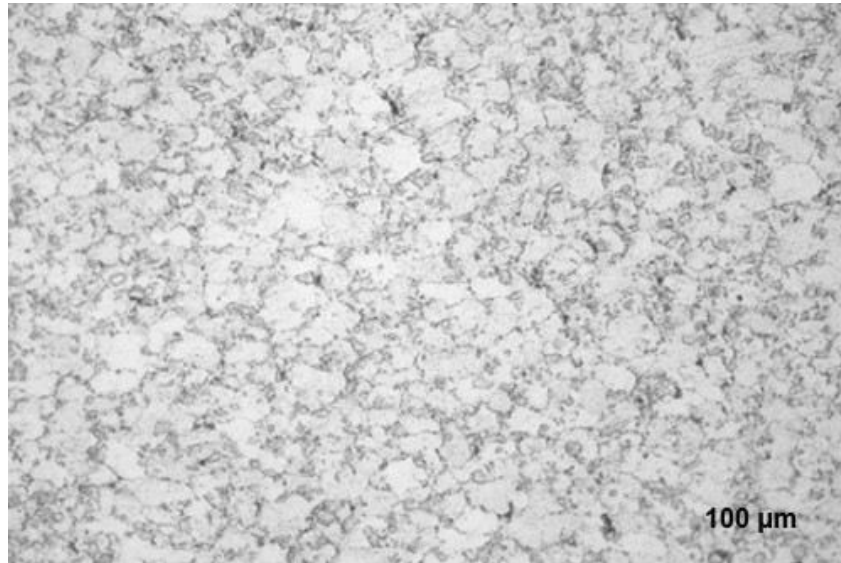


(b)

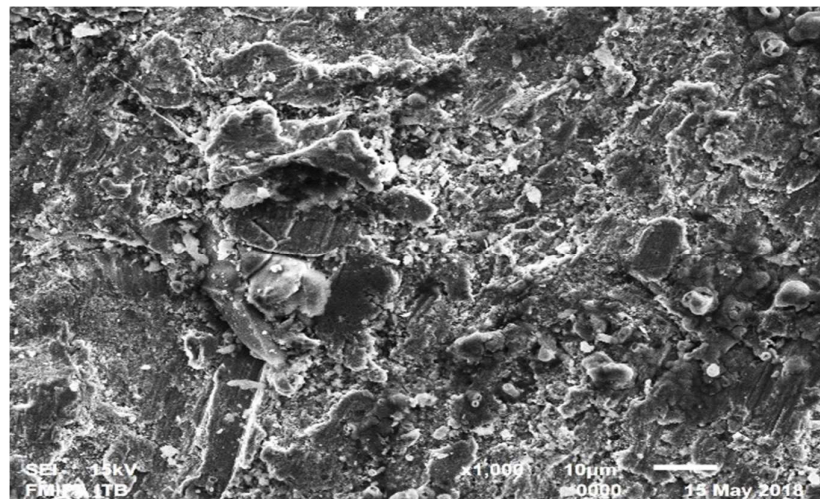
Gambar 4.13 Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan type *natural cooling* kapasitas 20% FD Fan dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x(b)

Perlakuan pemanasan dan pendinginan dengan *forced cooling* menggunakan FD Fan dengan kapasitas 20% menghasilkan struktur mikro material *ferrite* dan *Pearlite* dengan ukuran grain 3.89 μm .

Hasil perlakuan pipa T91 dengan pemanasan pada suhu 540 $^{\circ}\text{C}$ kemudian diikuti dengan pendinginan dengan tipe *forced cooling* dengan kapasitas 40% *FD Fan* seperti pada gambar 4.14.



(a)



(b)

Gambar 4.14 Hasil pengujian struktur mikro setelah perlakuan pemanasan dan pendinginan type *forced cooling* kapasitas 40% FD Fan dengan perbesaran 100x (a) dan 1000x(b)

Perlakuan pemanasan dan pendinginan dengan *forced cooling* menggunakan *FD Fan* dengan kapasitas 40% menghasilkan struktur mikro *ferrite* dan *Pearlite* dengan ukuran grain 4.22 μm .

Berdasarkan grafik *Isothermal Transformation diagram* (Gambar 2.7) menunjukkan bahwa dengan pendinginan kontinyu dengan laju pendinginan yang lambat dari temperatur 650 °C menuju temperatur 316 °C akan terbentuk fasa *ferrite* dan *pearlite* dengan waktu pendinginan $> 5 \times 10^3$. Kemudian dari temperatur 316 °C (Ms) fasa *martensite* mulai terbentuk namun fasa *ferrite* dan *pearlite* masih terbentuk sampai temperatur 204 °C. Dibawah temperatur 204 °C seluruh fasa yang terbentuk adalah *martensite*. Pada pengamatan struktur mikro yang terbentuk setelah proses pendinginan baik *natural cooling*, *forced cooling* dengan *FD Fan* 20% dan *FD Fan* 40% adalah *ferrite* dan *pearlite*. Hal ini telah sesuai dengan grafik *Isothermal Transformation Diagram* bahwa fasa yang terbentuk dengan penurunan temperatur dari 540 °C menuju 300 °C minimal terjadi pada metode *forced cooling FD Fan* 40% yaitu 14.400 second.

Pada pengamatan ukuran grain, pengaruh proses pendinginan *natural cooling* dan *forced cooling* dengan kapasitas 20% dan 40% *FD Fan* menyebabkan ukuran grain yang berbeda beda. Pada temperatur tinggi ukuran grain akan mengalami peningkatan (*Grain Growth*) dengan adanya diffusi atom pada batas atom. Kemudian saat pendinginan akan terjadi proses diffusi kembali namun dikarenakan proses kembalinya atom atom penyusun dari grain membutuhkan waktu untuk kembali keposisi awal sehingga ukuran grain tidak sama. Pengaruh pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menghasilkan struktur mikro yang sama dengan *natural cooling*, sehingga tidak berpengaruh pada kemampuan untuk dilas (*Weldability*). Kemampuan untuk dilas (*weldability*) ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu Metalurgi las (*Welding metallurgy*), Kimia Pengelasan (*Welding Chemistry*), Kondisi permukaan sambungan. Geometri (bentuk) sambungan [12]

4.3. Hasil dan pembahasan data pengujian Kekerasan dan kekuatan tarik

4.3.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilaksanakan untuk mengetahui kekuatan dari material superheater SA213 T91 yang telah mengalami pemanasan dan

pendinginan dengan metode *natural cooling*, *Forced Cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% dan 40% dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil Pengujian kekerasan untuk material awal

No	HV	\overline{HV}	$HV - \overline{HV}$	$(HV - \overline{HV})^2$
1	213	208,7	4,3	18,8
2	205	208,7	-3,7	13,4
3	208	208,7	-0,7	0,4
Σ	626			32,7

Hasil Pengukuran = $\overline{HV} \pm Sx = 208.7 \pm 4.04$

Hasil pengukuran kekerasan untuk material awal adalah 204.6 s.d 212.7 HV. Tabel 4.4 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode *natural cooling*

No	HV	\overline{HV}	$HV - \overline{HV}$	$(HV - \overline{HV})^2$
1	204,0	202,7	1,3	1,8
2	207,0	202,7	4,3	18,8
3	205,5	202,7	2,8	8,0
4	194,5	202,7	-8,2	66,7
5	199,0	202,7	-3,7	13,4
6	203,0	202,7	0,3	0,1
7	210,0	202,7	7,3	53,8
8	195,0	202,7	-7,7	58,8
9	206,0	202,7	3,3	11,1
Σ	1824,0			232,5

Hasil Pengukuran = $\overline{HV} \pm Sx = 202.7 \pm 5.4$

Hasil pengukuran kekerasan untuk material awal adalah 197.3 s.d 208.1 HV.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%

No	HV	\overline{HV}	$HV - \overline{HV}$	$(HV - \overline{HV})^2$
1	210,0	204,1	5,9	35,3
2	195,0	204,1	-9,1	82,0
3	203,0	204,1	-1,1	1,1
4	198,0	204,1	-6,1	36,7
5	199,5	204,1	-4,6	20,8
6	195,0	204,1	-9,1	82,0
7	210,0	204,1	5,9	35,3
8	218,0	204,1	13,9	194,4
9	208,0	204,1	3,9	15,6
Σ	1836,5			503,2

Hasil Pengukuran = $\overline{HV} \pm Sx = 204.1 \pm 7.9$

Hasil pengukuran kekerasan untuk material awal adalah 196.1 s.d 212 HV.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian kekerasan setelah mengalami pemanasan dan dilakukan pendinginan dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%

No	HV	\overline{HV}	$HV - \overline{HV}$	$(HV - \overline{HV})^2$
1	201,0	199,8	1,2	1,4
2	195,0	199,8	-4,8	23,4
3	193,5	199,8	-6,3	40,1
4	199,0	199,8	-0,8	0,7
5	185,0	199,8	-14,8	220,0
6	205,0	199,8	5,2	26,7
7	208,0	199,8	8,2	66,7
8	207,0	199,8	7,2	51,4
9	205,0	199,8	5,2	26,7
Σ	1798,5			457,0

Hasil Pengukuran = $\overline{HV} \pm Sx = 199.8 \pm 7.6$

Hasil pengukuran kekerasan untuk material awal adalah 192.3 s.d 207.4 HV.

Berdasarkan ASTM A213/A213 M-15a, nilai kekerasan material T91 adalah 196 – 265 HV. Dari hasil pengujian kekerasan, pendinginan material dengan metode *natural cooling* dan *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% masih memenuhi range standar kekerasan material T91 yang diatur dalam Standar ASTM A213/A213M-15a. sedangkan untuk pendinginan metode

forced cooling dengan kapasitas *FD Fan* 40% didapatkan 22% data terdapat data nilai kekerasan dibawah standar.



Gambar 4.15 Hasil pengujian kekerasan

Berdasarkan gambar 4.15 hasil pengujian kekerasan setelah perlakuan panas dan pendinginan dengan metode *natural cooling*, didapatkan nilai kekerasan rata rata yang lebih rendah dari pada material as receive. Hal ini berhubungan dengan hasil pengujian struktur mikro dan hasil grain size. pada blanko mikrostrukturnya dominan martensite sedangkan mikrostruktur setelah pemanasan dan pendinginan dengan *natural cooling* struktur mikronya adalah *ferrite* dan *pearlite*. Sifat dari *martensite* rapuh dan keras, sedangkan *ferrite* memiliki sifat magnetis dan lunak. Kekerasan maksimum yang terbentuk tergantung pada berapa % *martensite* yang terbentuk [13]. Dengan pendinginan *natural cooling* prosentase struktur mikro *martensite* lebih rendah dari pada as receive, sehingga nilai kekerasan setelah perlakuan panas dan pendinginan dengan metode *natural cooling* lebih rendah.

Hasil pengujian kekerasan pada material setelah perlakuan panas kemudian didinginkan dengan metode *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% menghasilkan nilai kekerasan rata rata yang lebih tinggi dari pada pendinginan *natural cooling*.

Hasil pengujian kekerasan pada material setelah perlakuan panas kemudian didinginkan dengan metode *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 40% menghasilkan nilai kekerasan rata rata yang lebih rendah dari pada pendinginan *forced cooling* dengan kapasitas *FD Fan* 20% dan *natural cooling*.

Hal ini dikarenakan berkaitan dengan ukuran grain size, semakin kecil ukuran butir berarti semakin banyak jumlah butir. Jumlah butir yang semakin banyak berarti area batas butir semakin luas sehingga semakin banyak terjadi mekanisme pile up atau penumpukan dislokasi pada batas butir, akibatnya material menjadi lebih keras.

4.3.2 Pengujian kekuatan Tarik

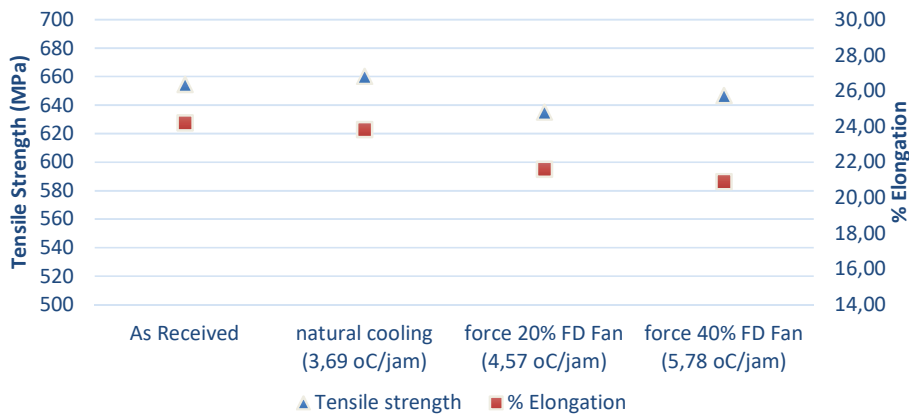
Sifat Mekanik material dapat diketahui dengan melakukan pengujian Tarik. Hasil dari pengujian Tarik dihasilkan nilai kekuatan maksimum dan persentase elongasi yang terjadi pada material.

Tabel 4.7 Nilai kekuatan Tarik maksimum dan persentase elongasi pada perlakuan panas dan peninginan secara natural dan force material tube superheater T91

No	Sample	Kekuatan Tarik (MPa)	Regang / Elongasi (%)
1	blanko	654,59	24,20
2	natural cooling	660,28	23,84
3	<i>Forced cooling</i> 20% kapasitas FD Fan	635,18	21,61
4	<i>forced cooling</i> 40% kapasitas FD Fan	646,84	20,92

Berdasarkan spesifikasi material T91 sesuai dengan ASTM A213 tahun 2015 mempunyai minimum tensile strength 585 MPa. Berdasarkan data table 4. Proses pendinginan boiler baik menggunakan metode natural cooling dan forced cooling dengan kapasitas FD Fan 20 % dan 40%, nilai kekuatan Tarik masih memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan dengan nilai terendah Keuletan menyatakan kemampuan suatu material untuk berdeformasi plastis tanpa terjadi patah. Nilai keuletan material dapat ditinjau dari persentase elongasi material. Berdasarkan ASTM A213 tahun 2015, material T91 mempunyai nilai minimum % *elongation* sebesar 20%. Berdasarkan data table

4. Proses pendinginan boiler baik menggunakan metode *natural cooling* dan *forced cooling* dengan kapasitas FD Fan 20 % dan 40%, nilai persentase elongation masih memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan dengan nilai terendah 20,92 % pada pendinginan boiler menggunakan *forced cooling* dengan kapasitas FD Fan 40% dan tertinggi 23.84% pada pendinginan boiler menggunakan metode *natural cooling*.



Grafik 4.16 Pengaruh Pendinginan boiler pada kekuatan Tarik dan % Elongasi pada material tube superheater T91 menggunakan *natural cooling* dan *forced cooling* dengan 20% dan 40% kapasitas FD Fan

Berdasarkan grafik 4.16 penggunaan metode *forced cooling* pada pendinginan boiler menghasilkan nilai kekuatan tarik dan % elongasi yang lebih rendah dari pada penggunaan metode *natural cooling* yang selama ini digunakan. Persentase elongasi akan semakin menurun dengan kenaikan *cooling rate*, hal ini disebabkan oleh kehadiran fase keras dan rapuh seperti non-tempered martensite yang meningkatkan hardness dan kekuatan namun berpengaruh pada sifat keuletan (*ductility*) material tersebut.

Kekuatan tarik dan persentase elongasi merupakan kriteria kekuatan material. Untuk mengetahui pengaruh metode pendinginan boiler maka nilai kekuatan tarik dan persentase elongasi dikalikan [14]. Hasil perkalian antara kekuatan tarik dan prosentase elongasi dapat dilihat pada gambar 4.17. Secara umum nilai kekuatan akan turun seiring dengan kenaikan *cooling rate*. Nilai kekuatan tertinggi didapatkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* dan terendah pada metode *forced cooling* dengan kapasitas FD Fan

40%. Hal ini disebabkan oleh adanya *non-tempered martensite* pada struktur mikro yang membatasi keuletan maksimum yang dapat dicapai.

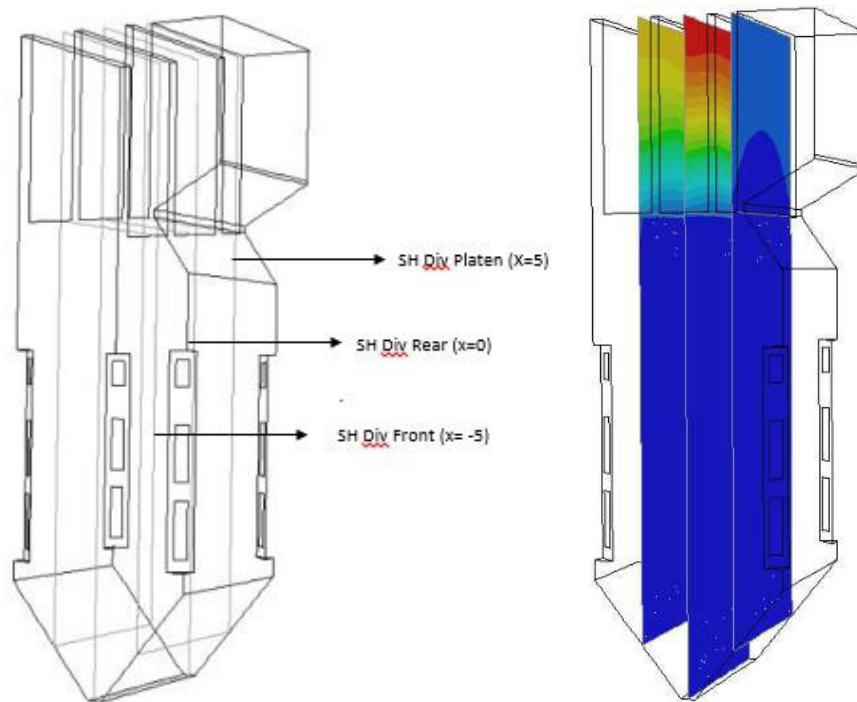


Grafik 4.17 Pengaruh Pendinginan boiler pada kekuatan pada material tube superheater T91 menggunakan natural cooling dan *forced cooling* dengan 20% dan 40% kapasitas FD Fan

1.4 Hasil analisa numerik distribusi temperatur area superheater.

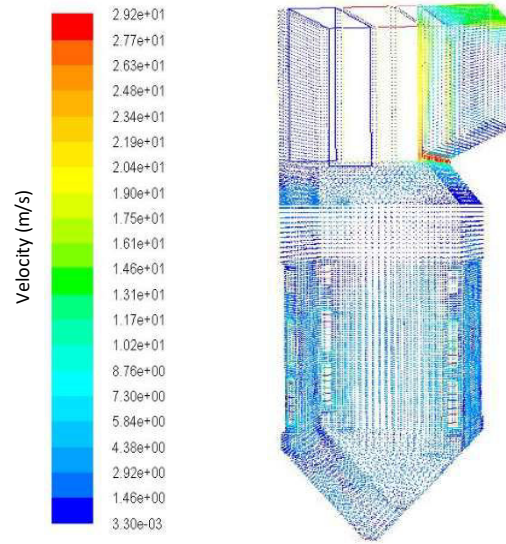
Analisa hasil simulasi dilakukan pada masing-masing kasus untuk mengetahui perbandingannya. Pengambilan data hasil simulasi dilakukan secara kualitatif (kontur distribusi temperatur) serta secara kuantitatif berupa grafik maupun data yang disajikan dalam bentuk tabel. Pengamatan akan dilakukan terhadap masing-masing area superheater, yaitu Superheater div front, superheater div rear dan superheater div platen, yang dilaksanakan pada pendinginan boiler forced cooling dengan kapasitas FD Fan 20% dan FD fan 40%. Simulasi ini dilaksanakan dengan 1000 iterasi.

Data kualitatif diambil pada penampang vertikal simetri boiler (*X-center*), Posisi pengamatan dilakukan dengan metode *plane*, dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Posisi pengamatan penampang vertikal simetri boiler (*x-center*) area superheater

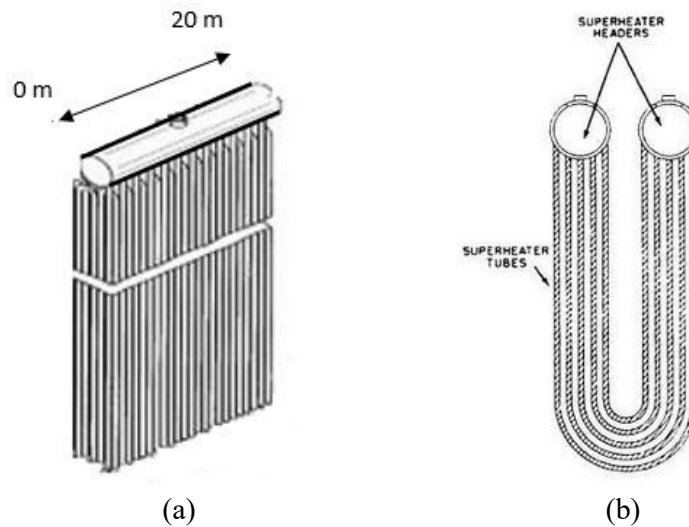
Pengamatan terhadap posisi simetri boiler dilakukan untuk mengetahui distribusi yang terjadi pada proses pendinginan boiler di area superheater. Pengambilan data kuantitatif dilakukan pada penampang vertikal area *superheater*. Untuk ilustrasi pergerakan partikel dari *burner air* hingga keluar menuju boiler *outlet* dapat dilihat pada gambar 4.19



Gambar 4.19 Tampilan ilustrasi vector kecepatan dari *burner air* hingga keluar menuju boiler *outlet*.

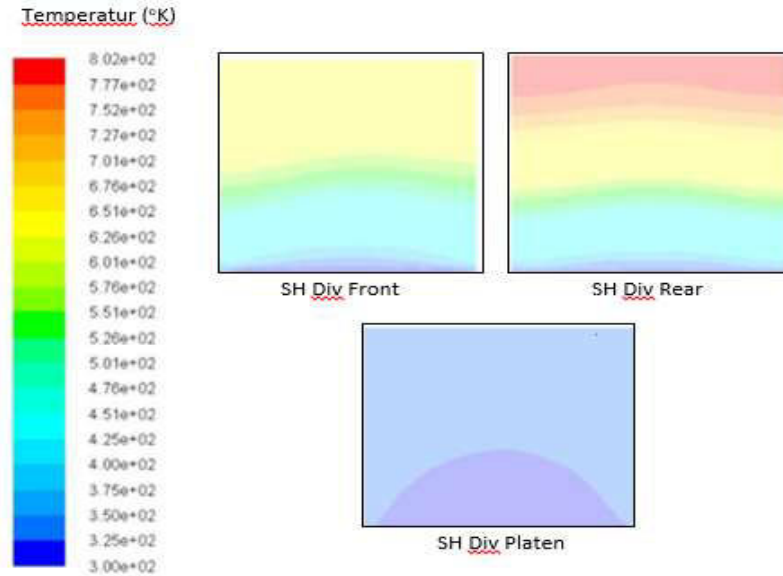
Distribusi Temperatur Posisi Simetri Boiler (*x-center*) pada forced cooling dengan FD Fan 20% dan 40%

Berdasarkan geometri boiler Unit PLTU Paiton 9 didapatkan arrangement tube superheat sebagai berikut:

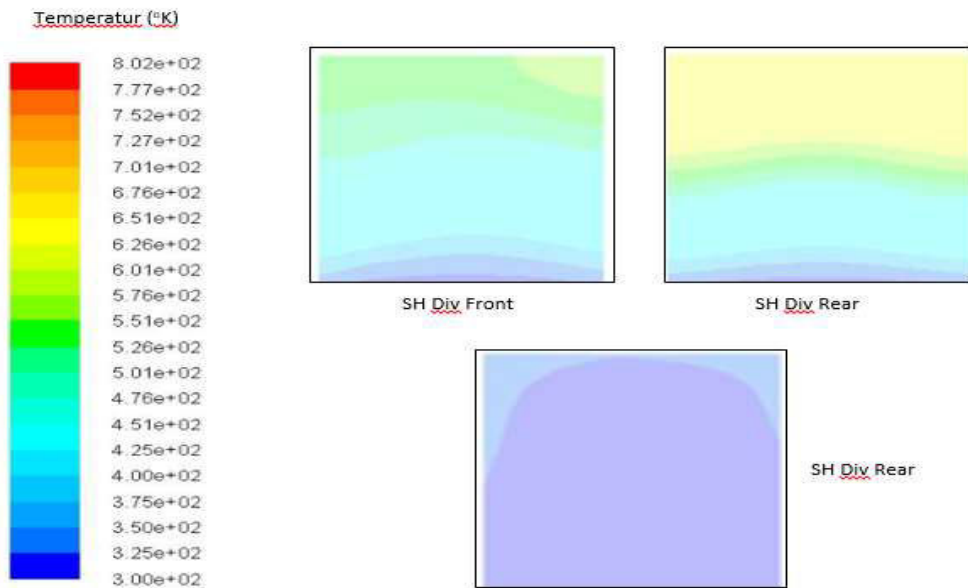


Gambar 4.20 Tampilan ilustrasi arrangement *tube superheater* tampak depan (a) dan tampak samping (b)

Hasil simulasi numerik distribusi temperatur penampang vertikal posisi simetri boiler dari masing-masing kasus dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4



Gambar 4.21 Kontur distribusi temperatur pada posisi penampang vertikal simetri superheater (*x-center*) pada pendinginan boiler forced cooling FD fan 20%

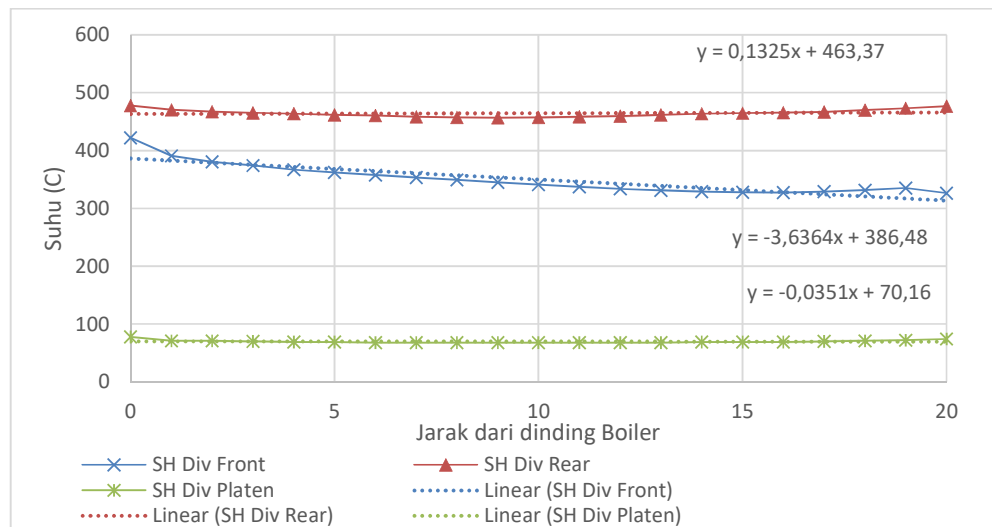


Gambar 4.22 Kontur distribusi temperatur pada posisi penampang vertikal simetri superheater (*x-center*) pada pendinginan boiler forced cooling FD fan 40%

Berdasarkan gambar 4.20 dan 4.21 distribusi temperatur area superheater pada sumbu Z (-10 s.d 10) memiliki distribusi temperatur yang tidak merata. Di bagian atas (header pipa superheater) lebih tinggi tingkat warnanya menunjukkan temperatur nya lebih tinggi. Dan bagian tepian lebih tinggi temperaturnya dari pada area tengah dilihat dari sebaran warnanya. Dari ketiga area superheater didapatkan superheater div rear mempunyai distribusi temperatur yang lebih tinggi daripada superheater div front dan superheater div platen. Berdasarkan sebaran warna antara pendinginan forced cooling FD Fan 20% didapatkan temperatur ketiga area superheater lebih tinggi dari pada forced cooling FD Fan 40%. Hal ini dikarenakan massa udara pendinginan pada forced cooling FD Fan 40% 2 kali lebih tinggi.

Data Kuantitatif Distribusi Temperatur

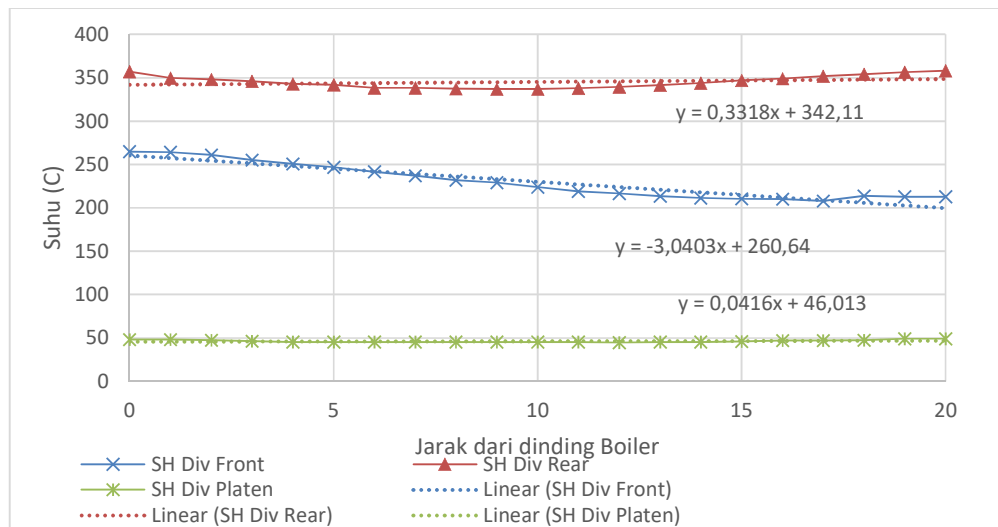
Data kuantitatif berupa nilai temperatur pada masing-masing area superheater pada pendinginan boiler forced cooling FD Fan 20% dan 40%. Hasil distribusi temperatur digambarkan berupa grafik, dapat dilihat pada gambar 4.23 dan 4.24 Data diambil berupa nilai temperatur *average* yang diambil dari pembuatan *plane* pada masing-masing superheater.



Gambar 4.23 Grafik perbandingan *average temperature* penampang superheater untuk pendinginan boiler dengan forced cooling 20%

Berdasarkan Gambar 4.23 distribusi temperatur pada saat pendinginan boiler untuk forced cooling FD Fan 20% didapat data distribusi pada area

superheater Div Front dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) mengalami penurunan temperatur, dan perbedaan temperatur sebesar $56\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk area superheater Div Rear dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) mengalami penurunan temperatur, dan perbedaan temperatur sebesar $39.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk area superheater Div Platen dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) distribusi temperatur relative seragam dengan perbedaan temperatur sebesar $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4.24 Grafik perbandingan *average temperature* penampang superheater untuk pendinginan boiler dengan forced cooling 40%

Berdasarkan Gambar 4.24 distribusi temperatur pada saat pendinginan boiler untuk forced cooling FD Fan 40% didapat data distribusi pada area superheater Div Front dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) mengalami penurunan temperatur, dan perbedaan temperatur sebesar $52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk area superheater Div Rear dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) mengalami penurunan temperatur, dan perbedaan temperatur sebesar $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk area superheater Div Platen dari dinding boiler (jarak $z = 0$) s.d titik superheater terjauh (Jarak $z=20$ m) distribusi temperatur relative seragam dengan perbedaan temperatur sebesar $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi *software CFD*, pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan *FD Fan* dengan kapasitas 20% untuk menurunkan temperatur dari 540 °C – 60 °C membutuhkan waktu 109 Jam dengan laju penurunan temperatur 0,0012232 °C/detik
2. Dari hasil simulasi *software CFD*, pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan *FD Fan* dengan kapasitas 40% untuk menurunkan temperatur dari 540 °C – 60 °C membutuhkan waktu 109 Jam dengan laju penurunan temperatur 0,0014981 °C/detik
3. Struktur mikro yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling*, *forced cooling FD Fan 20%* dan *40%* adalah *ferrite* dan *Pearlite*.
4. Kekerasan yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 202.7 ± 5.4 HV. Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 204.1 ± 7.9 . dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 199.8 ± 7.6 HV
5. Kekuatan tarik yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 660,28 MPa Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 635,18 MPa dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 646,84 MPa
6. Prosentase elongasi hasil dari pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 23,84 %. Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 21,61% dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 20,92%

7. Metode pendinginan boiler dengan *forced cooling* kapasitas 20% merupakan metode pendinginan yang optimum ditinjau dari sisi waktu dan pengaruh pada sifat mekanik (kekerasan, kekuatan tarik dan elongasi) material T91 yang disesuaikan dengan standar ASTM A213M – 15a

5.2 Saran

Berikut ini beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk menjadi masukan kepada perusahaan dan untuk penelitian lebih lanjut.

1. Perlu dilakukan kajian pengaruh *forced cooling* terhadap penyusutan dimensi panjang pipa yang tidak seragam sehingga beresiko menghasilkan *crack* pada sistem perpipaan.
2. Hasil penelitian ini dapat dijadikan masukan dalam memutuskan pendinginan boiler jika dibutuhkan waktu pemeliharaan yang singkat.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi *software CFD*, pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan *FD Fan* dengan kapasitas 20% untuk menurunkan temperatur dari 540 °C – 60 °C membutuhkan waktu 109 Jam dengan laju penurunan temperatur 0,0012232 °C/detik
2. Dari hasil simulasi *software CFD*, pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan *FD Fan* dengan kapasitas 40% untuk menurunkan temperatur dari 540 °C – 60 °C membutuhkan waktu 109 Jam dengan laju penurunan temperatur 0,0014981 °C/detik
3. Struktur mikro yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling*, *forced cooling FD Fan 20%* dan *40%* adalah *ferrite* dan *Pearlite*.
4. Kekerasan yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 202.7 ± 5.4 HV. Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 204.1 ± 7.9 . dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 199.8 ± 7.6 HV
5. Kekuatan tarik yang dihasilkan pada pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 660,28 MPa Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 635,18 MPa dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 646,84 MPa
6. Prosentase elongasi hasil dari pendinginan boiler dengan metode *natural cooling* adalah 23,84 %. Sedangkan dengan metode *forced cooling* kapasitas *FD Fan 20%* adalah 21,61% dan dengan kapasitas *FD Fan 40%* adalah 20,92%

7. Metode pendinginan boiler dengan *forced cooling* kapasitas 20% merupakan metode pendinginan yang optimum ditinjau dari sisi waktu dan pengaruh pada sifat mekanik (kekerasan, kekuatan tarik dan elongasi) material T91 yang disesuaikan dengan standar ASTM A213M – 15a

5.2 Saran

Berikut ini beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk menjadi masukan kepada perusahaan dan untuk penelitian lebih lanjut.

1. Perlu dilakukan kajian pengaruh *forced cooling* terhadap penyusutan dimensi panjang pipa yang tidak seragam sehingga beresiko menghasilkan *crack* pada sistem perpipaan.
2. Hasil penelitian ini dapat dijadikan masukan dalam memutuskan pendinginan boiler jika dibutuhkan waktu pemeliharaan yang singkat.

DAFTAR PUSTAKA

1. PT. PLN (Persero) (2007), "Protap Deklarasi Kondisi Pembangkit Dan Indeks Kinerja Pembangkit"
2. L.Ceschini, A.Marconi, C.Martini, A.Morri, A.DiSchino, (2013), "Tensile and impact behaviour of a microalloyed medium carbon steel : Effect of the cooling condition and corresponding microstructure" *Material and design*, Vol. 45, hal. 171-178.
3. D.Q. Bai, S.Yue, T.M.Maccagno and J.J. Jonas, (1998), "Effect of Deformation and cooling rate on the microstructure of low carbon Nb-B Steels" *ISIJ Internasional*, Vol.38, No. 4, hal. 371-379.
4. Jenan Mohammed Nagie, (2014) "The Effect of cooling rate on mechanical properties of carbon steel (St 35)" *Engineering Sciences*, Vol.07, No. 01, hal.109-118.
5. L.Storojeva, D.Ponge, R.Kaspar, D.Raabe, (2004) "Development of microstructure and texture of medium carbon steel during heavy warm deformation" *Acta Materialia*, Vol. 52, hal. 2209-2220.
6. S.Serajzadeh, (2004), "Modelling of temperatur history and phase transformation during cooling of steel" *materials processing technology*, Vol. hal. 311-317.
7. Babcox & Wilcox company (1992)"Steam its generation and use" fourtieth edition.
8. Tata surdia, Shinroku saito, (1999) "Pengetahuan Bahan Teknik" Pradnya paramita, edisi ke 4.
9. ASTM E3-1, (2007), "Standard prcactice for preparation metalographic specimens", ASM International.
10. J. Van den Bosch, D. Sapundjiev, A. Almazouzi, (2006),"Effect of temperature and strain rate on the mechanical properties of T91 material tested in liquid lead bismuth eutectic", *nuclear Material*, Vol. 356.
11. R. Adawiyah, Murjani, A. Hendrawan, (2014) "Pengaruh perbedaan media pendingin terhadap struktur mikro dan kekerasan pegas daun dalam proses hardening" *Poros Teknik*, Vol. 6, No. 2
12. Sarjito Jokosisworo, (2006) "Weldability, welding metallurgy, welding chemistry" *Jurnal Kapal*, Vol.3, No.3

13. B.A.Septianto, Y.Setyorini, (2013), "Pengaruh media pendingin pada Heat Treatment terhadap struktur mikro dan sifat mekanik Friction Wedge AISI 1340" Teknik POMITS, Vol.2, No.2, hal 2337-2359.
14. D. Rasouli, Sh. Khameneh Asl, A. Akbarzadeh, G.H. Daneshi, (2008), "Effect of Cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel" Material Processing Technology, Vol.206. hal 92-98.
15. Q S Wang, W Q Wang, Z M Shi (2018)"Study on microstructure of directional solidified T91 Steel" Earth and environmental science, Vol.106.

LAMPIRAN 1

DATA PENURUNAN TEMPERATUR SUPERHEATER SAAT SHUTDOWN BOILER DENGAN PENDINGINAN NATURAL

1. Tabel penurunan temperatur shutdown boiler tanggal 22 desember 2017

Tanggal	Pukul	Beban	Final SH Metal Temp					
			1	9	16	17	25	29
22-Des	20.00	645	526	533	541	544	535	546
	22.22	501	525	536	539	537	533	540
23-Des	00.39	409	527	534	532	525	517	513
	00.52	273	519	529	521	509	502	498
	01.18	0	471	484	475	460	461	459
	02.09	0	421	421	419	403	399	391
	03.00	0	374	361	365	351	346	340
	04.05	0	334	318	325	314	309	306
	05.09	0	283	284	291	282	280	270
	06.07	0	258	259	266	258	256	254
	07.05	0	240	241	247	240	240	237
	08.03	0	226	226	232	226	225	223
	09.01	0	212	212	219	213	212	211
	10.18	0	198	198	204	199	198	198
	11.16	0	199	201	204	199	200	200
	12.14	0	197	200	201	198	199	199
	13.12	0	193	198	198	195	197	196
	14.10	0	188	195	195	191	194	194
	15.10	0	185	192	191	188	192	190
	16.06	0	180	190	188	185	189	187
	17.04	0	176	187	184	182	186	183
	18.02	0	171	184	181	179	183	181
19.06	0	169	180	177	174	179	181	
20.01	0	167	177	173	170	179	181	
21.02	0	165	176	169	166	179	181	
22.06	0	162	175	162	161	179	180	
23.11	0	160	174	158	158	178	178	

2. Tabel penurunan temperatur shutdown boiler tanggal 22 desember 2017
(lanjutan)

Tanggal	Pukul	Beban	Final SH Metal Temp					
			1	9	16	17	25	29
24-Des	00.00	0	158	173	157	158	177	177
	01.05	0	155	173	161	162	175	175
	02.09	0	153	172	162	162	174	173
	03.00	0	151	171	162	162	173	171
	04.05	0	149	170	160	160	171	169
	05.09	0	146	168	158	159	170	167
	06.00	0	144	167	157	158	168	166
	07.05	0	142	165	156	156	166	164
	08.09	0	139	164	154	154	165	162
	09.04	0	138	162	152	153	163	160
	10.05	0	136	160	151	152	161	158
	11.10	0	134	159	149	150	159	155
	12.01	0	133	157	148	149	157	154
	13.06	0	131	156	146	147	155	152
	14.10	0	130	154	144	145	153	150
	15.02	0	128	152	143	144	152	148
	16.06	0	132	151	143	143	150	147
	17.01	0	138	151	143	142	150	147
	18.02	0	139	150	142	142	148	147
	19.06	0	140	149	137	137	147	145
	20.10	0	140	148	137	137	145	144
	21.01	0	139	147	136	136	144	142
	22.06	0	138	145	135	135	142	140
23.11	0	137	144	133	133	140	138	
25-Des	00.02	0	136	143	132	132	139	136
	01.05	0	134	141	130	130	137	134
	02.09	0	133	139	129	129	135	132
	03.00	0	132	138	127	127	134	130
	04.05	0	130	137	126	126	132	129
	05.06	0	129	135	124	124	130	127
	06.00	0	127	134	132	122	129	125
	07.06	0	126	132	121	121	127	124
	08.00	0	124	131	119	119	125	122
	09.01	0	123	129	118	118	124	121
	10.05	0	122	128	117	116	122	119
	11.10	0	120	126	115	115	120	117
	12.01	0	119	125	114	114	119	116
	13.06	0	118	124	113	112	118	115
	14.10	0	117	122	112	111	118	114
	15.01	0	117	121	111	110	116	113
	16.06	0	115	120	110	109	115	112
	17.10	0	115	119	109	108	114	111
	18.02	0	113	118	108	107	113	110
	19.06	0	112	116	107	106	112	109
20.10	0	111	115	106	106	110	108	
21.02	0	110	114	105	105	109	107	
22.06	0	109	113	104	104	108	106	
23.08	0	108	111	103	103	107	105	

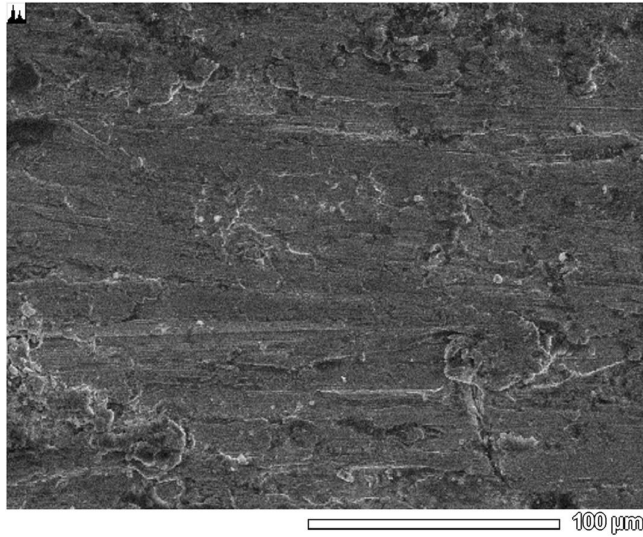
3. Tabel penurunan temperatur shutdown boiler tanggal 22 desember 2017
(lanjutan)

Tanggal	Pukul	Beban	Final SH Metal Temp					
			1	9	16	17	25	29
26-Des	00.00	0	107	111	103	102	107	105
	01.05	0	106	109	102	101	106	104
	03.01	0	105	108	100	100	104	103
	06.01	0	101	104	98	99	102	102
	09.01	0	98	102	95	96	99	99
	12.01	0	96	99	93	92	96	95
	15.02	0	93	96	90	89	93	92
	18.02	0	90	93	88	87	91	91
	21.02	0	88	91	86	85	89	88
27-Des	00.00	0	86	89	84	83	87	86
	03.01	0	84	87	82	81	85	84
	06.01	0	82	85	80	79	83	82
	09.01	0	80	83	79	78	81	81
	12.01	0	78	81	71	71	79	79
	15.02	0	75	79	72	72	77	77
	18.02	0	74	77	70	70	76	75
	21.02	0	73	75	69	69	74	74
28-Des	00.00	0	71	74	71	71	73	74
	06.01	0	69	71	68	69	71	72
	12.01	0	66	69	70	65	67	68
	18.01	0	63	65	50	57	64	64
29-Des	00.00	0	60	60	47	53	61	62
	06.01	0	57	57	46	51	57	59
	12.01	0	55	54	47	50	55	56
	18.02	0	53	52	46	49	53	55
30-Des	00.00	0	52	51	48	51	53	56
	06.00	0	50	51	49	50	51	54
	12.01	0	48	49	48	48	50	52
	18.01	0	48	49	48	50	50	53
31-Des	00.00	0	47	48	47	49	49	52
01-Jan	00.00	0	44	45	44	44	45	47
02-Jan	00.00	0	40	43	42	42	43	44
03-Jan	00.00	0	39	41	40	40	41	41

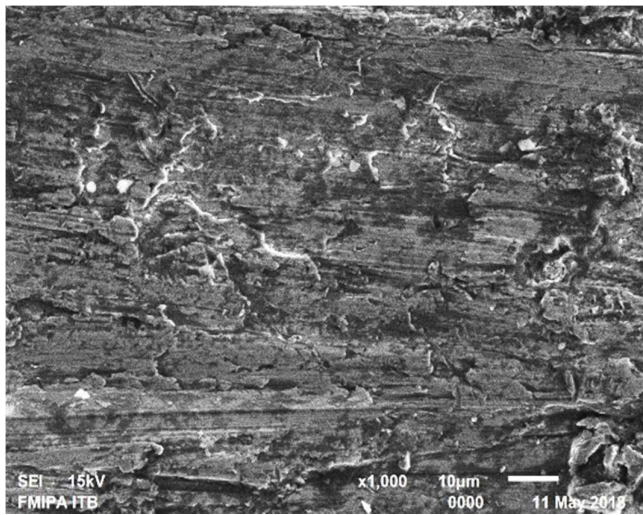
LAMPIRAN 2

DATA PENGUJIAN SEM

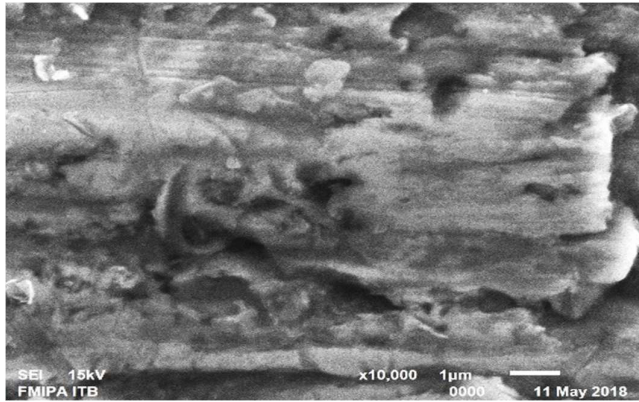
1. Blanko



Hasil Uji SEM Perbesaran 100 μm untuk Blanko

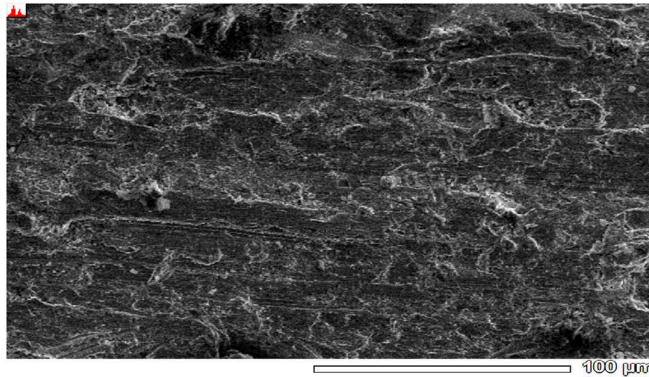


Hasil Uji SEM Perbesaran 10 μm untuk Blanko

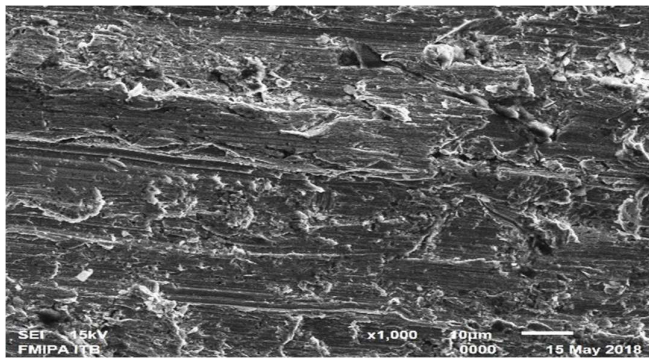


Hasil Uji SEM Perbesaran 1 µm untuk Blanko

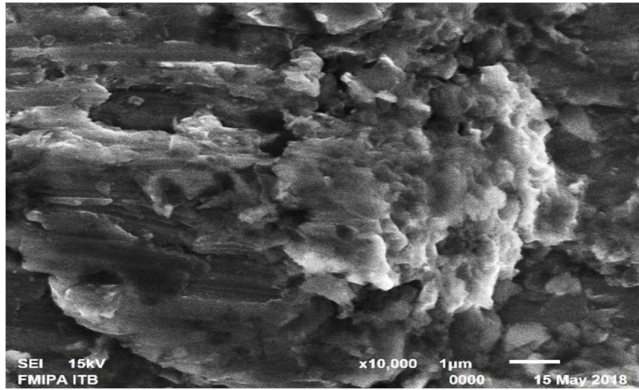
2. Pendinginan boiler dengan metode Natural Cooling



Hasil Uji SEM Perbesaran 100 µm untuk pendinginan natural cooling

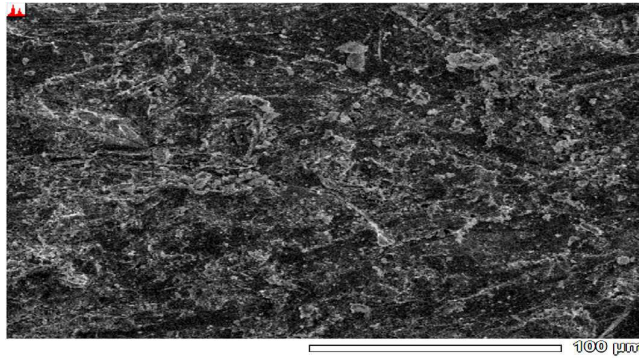


Hasil Uji SEM Perbesaran 10 µm untuk pendinginan natural cooling

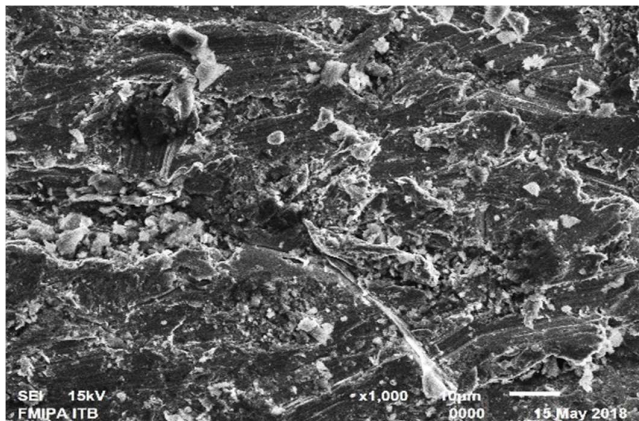


Hasil Uji SEM Perbesaran 10 μm untuk pendinginan natural cooling

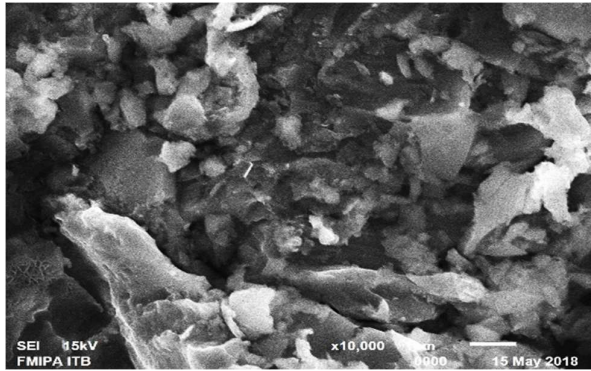
3. Pendinginan Boiler dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%



Hasil Uji SEM Perbesaran 100 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%

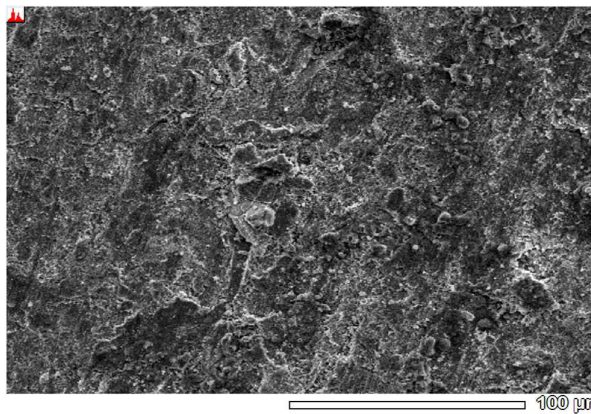


Hasil Uji SEM Perbesaran 10 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%

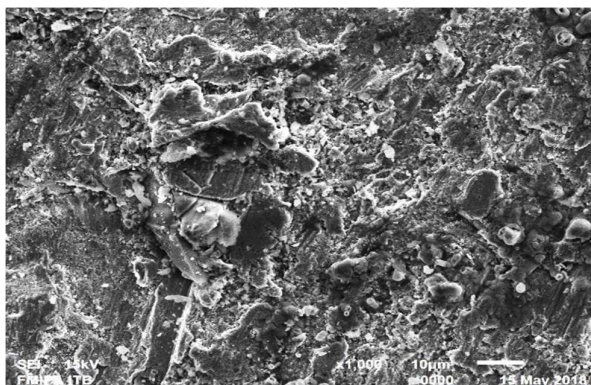


Hasil Uji SEM Perbesaran 1 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 20%

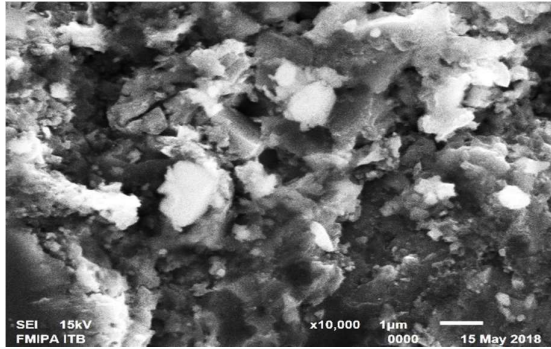
4. Pendinginan Boiler dengan metode forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%



Hasil Uji SEM Perbesaran 100 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%



Hasil Uji SEM Perbesaran 10 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%



Hasil Uji SEM Perbesaran 1 μm untuk pendinginan forced cooling dengan FD Fan kapasitas 40%

LAMPIRAN 3

DATA PENGUJIAN KEKERASAN



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax, (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemenperin.go.id/>

Nomor Analisa : P 3373 – P 3382
Jenis Sampel : Baja Paduan SA213 T91
Merku/Simbol : Blanko

No. analisa	Titik uji	Hasil Uji		Rata-rata
		HRB	HV (Konversi)	
P. 3373	1	95,6	213,0	208,7
	2	94,0	205,0	
	3	94,6	208,0	
P. 3374	1	93,7	204,0	205,5
	2	94,4	207,0	
	3	94,1	205,5	
P. 3375	1	91,9	194,5	198,8
	2	92,8	199,0	
	3	93,7	203,0	
P. 3376	1	95,0	210,0	203,7
	2	92,0	195,0	
	3	94,2	206,0	
P. 3377	1	95,0	210,0	202,7
	2	92,0	195,0	
	3	93,5	203,0	
P. 3378	1	92,6	198,0	197,5
	2	93,5	199,5	
	3	92,0	195,0	
P. 3379	1	95,0	210,0	212,0
	2	95,5	218,0	
	3	94,6	208,0	
P. 3380	1	94,8	201,0	196,5
	2	92,0	195,0	
	3	91,7	193,5	
P. 3381	1	93,6	199,0	196,3
	2	90,0	185,0	
	3	94,0	205,0	
P. 3382	1	94,8	208,0	206,7
	2	94,4	207,0	
	3	94,0	205,0	

Catatan : Sampel diuji sesuai permintaan menggunakan beban 100 kgf dengan Indentor bola pejal diameter 1/16"



LAMPIRAN 4

DATA PENGUJIAN KEKUATAN TARIK DAN PROSENTASE ELONGASI



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemenperin.go.id/>

Nomor Analisa : P. 3621 – P. 3623
Jenis Sampel : Baja Paduan SA213 T91
Merk : Sampel Blanko , B, C
Ukuran Tebal , mm : 6,3

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji		
		P. 3621 (Sampel Blanko)	P. 3622 (B)	P. 3623 (A)
Tebal	mm	6,304	6,352	6,032
Lebar	mm	18,8	12,77	17,8
Luas Penampang	mm ²	118,52	81,12	107,37
Panjang awal (Lo)	mm	50,57	50,43	50,58
Panjang Akhir (Lu)	mm	62,79	60,98	61,51
Beban Maksimum	kgf	7877	5351	6954
Kuat tarik	kgf/mm ²	66,75	65,96	64,77
Regang	%	24,16	20,92	21,61

Catatan :

- Sampel diuji sesuai dengan permintaan



Nomor Analisa : P. 3372
Jenis Sampel : Baja Paduan SA213 T91
Merk : A
Ukuran Tebal , mm : 6,3

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji
Tebal	mm	6,302
Lebar	mm	25,92
Luas Penampang	mm ²	163,35
Panjang awal (Lo)	mm	50,42
Panjang Akhir (Lu)	mm	62,44
Beban Maksimum	kgf	10998
Kuat tarik	kgf/mm ²	67,33
Regang	%	23,84

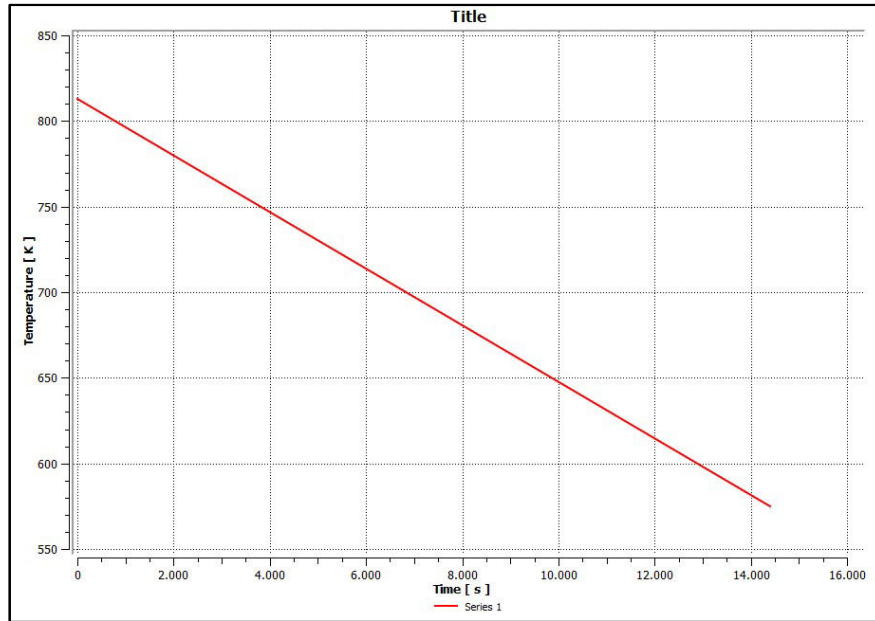
Catatan :

- Sampel diuji sesuai dengan permintaan

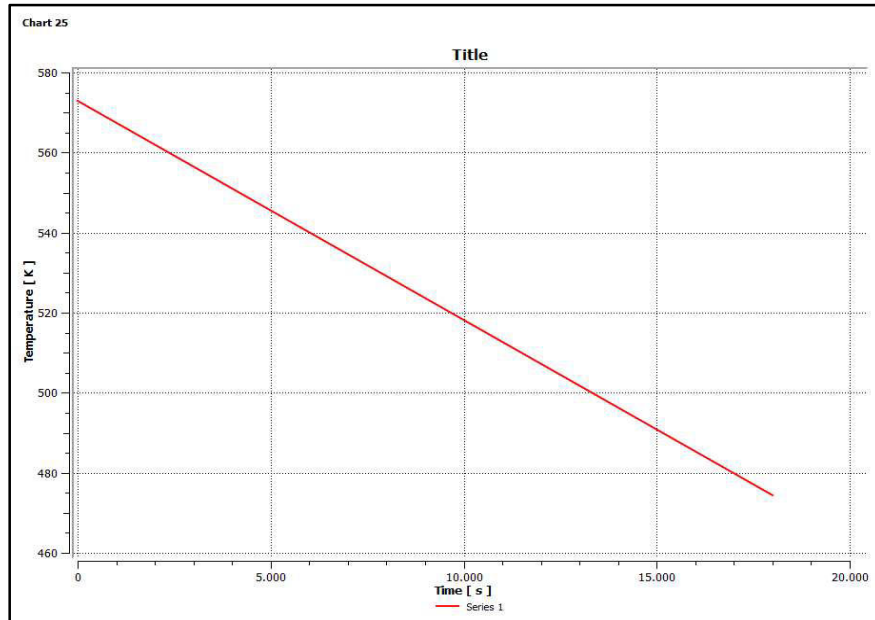


LAMPIRAN 5
GRAFIK LAJU PENURUNAN TEMPERATUR
SIMULASI FLUENT

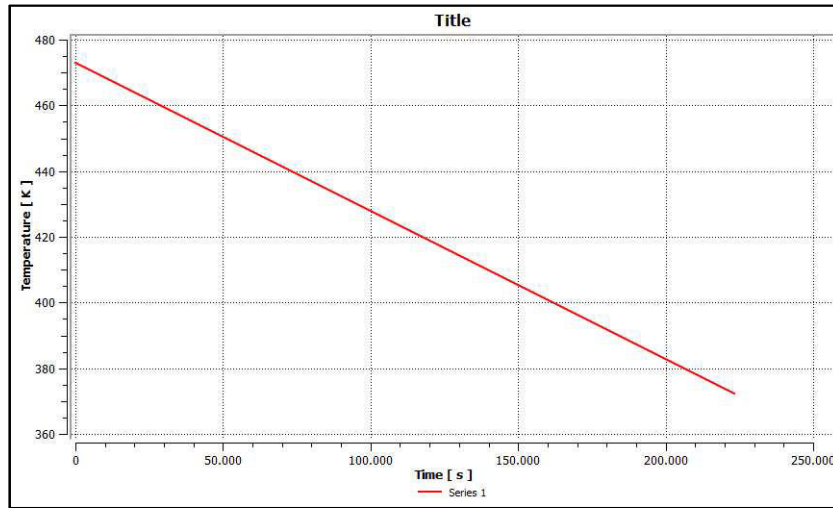
1. Pendinginan boiler dengan metode *natural cooling*



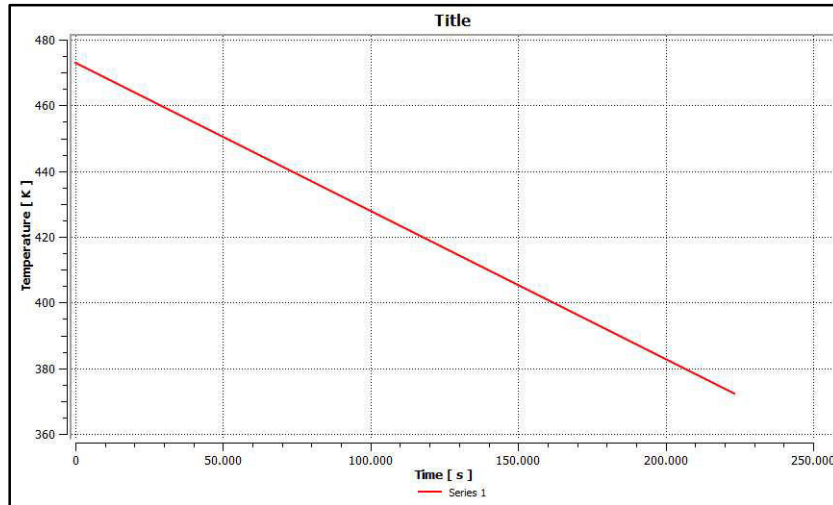
Laju penurunan temperatur vs waktu dari 540 °C ke 300 °C



Laju penurunan temperatur vs waktu dari 300 °C ke 200 °C

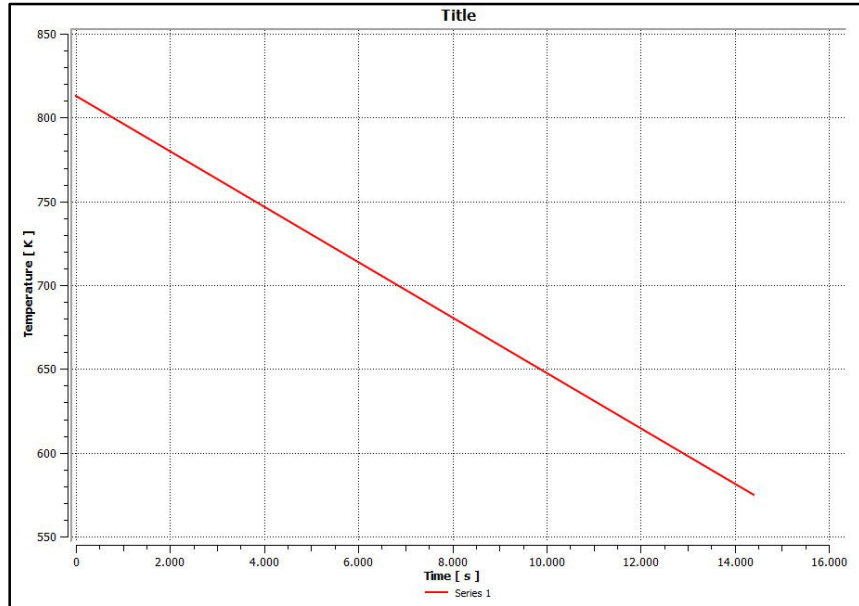


Laju penurunan temperatur vs waktu dari 200 °C ke 100 °C

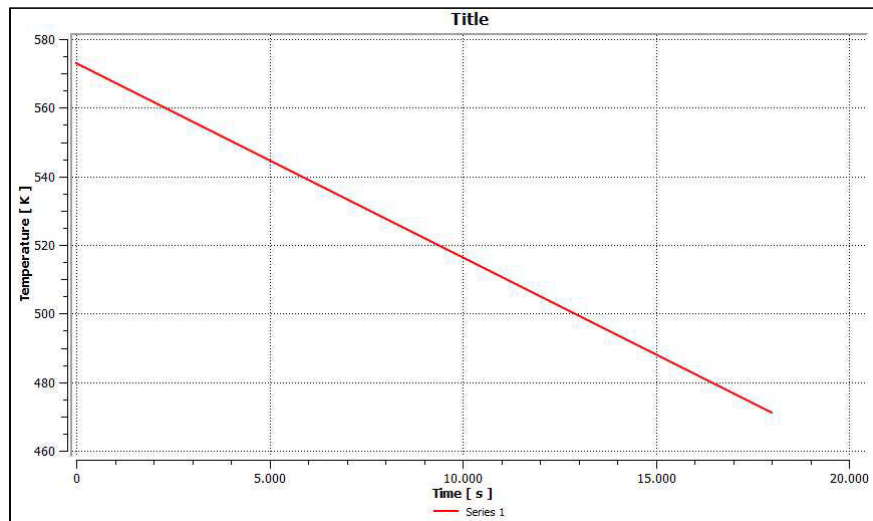


Laju penurunan temperatur vs waktu dari 200 °C ke 100 °C

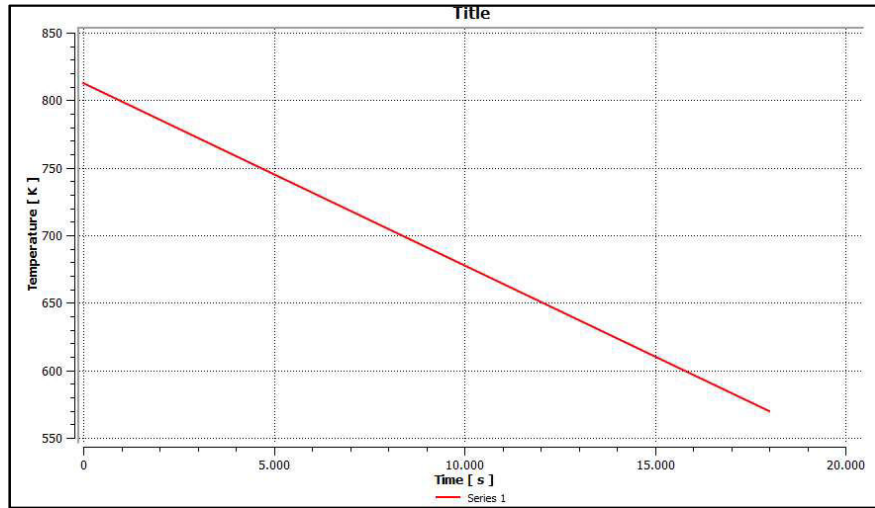
2. Pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan FD Fan kapasitas 20%



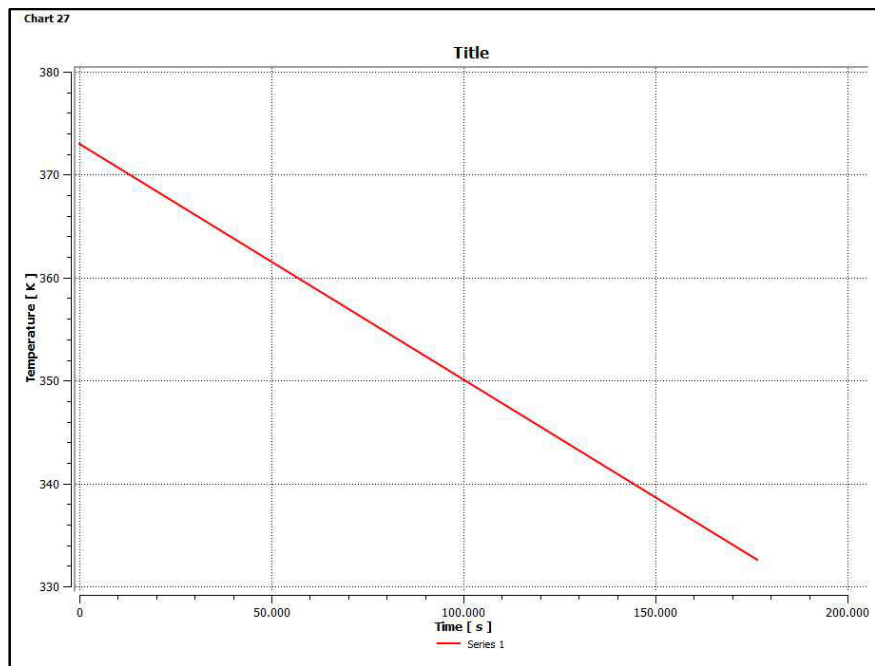
Laju penurunan temperatur vs waktu dari 540 °C ke 300 °C



Laju penurunan temperatur vs waktu dari 300 °C ke 200 °C

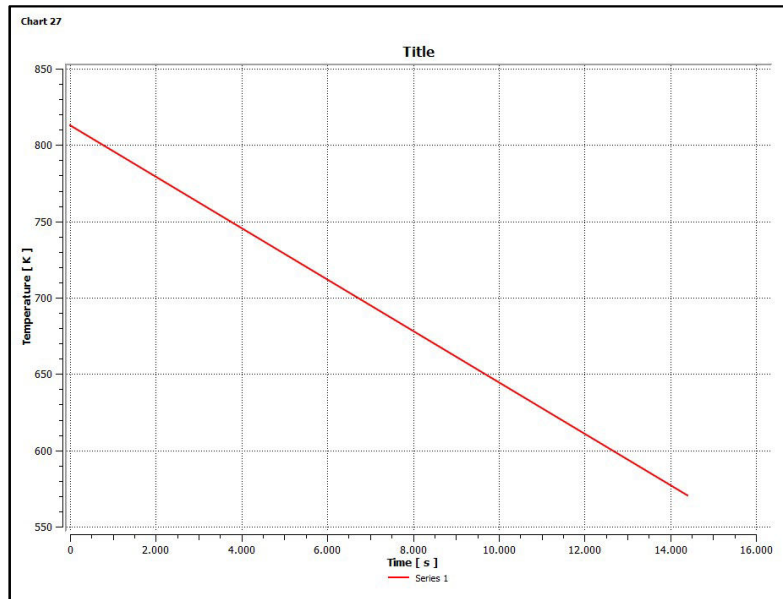


Laju penurunan temperatur vs waktu dari 200 °C ke 100 °C

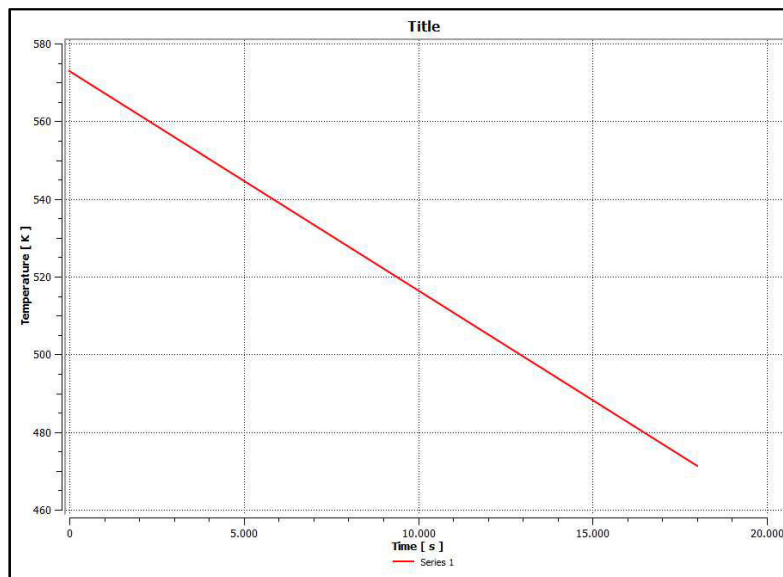


Laju penurunan temperatur vs waktu dari 100 °C ke 60 °C

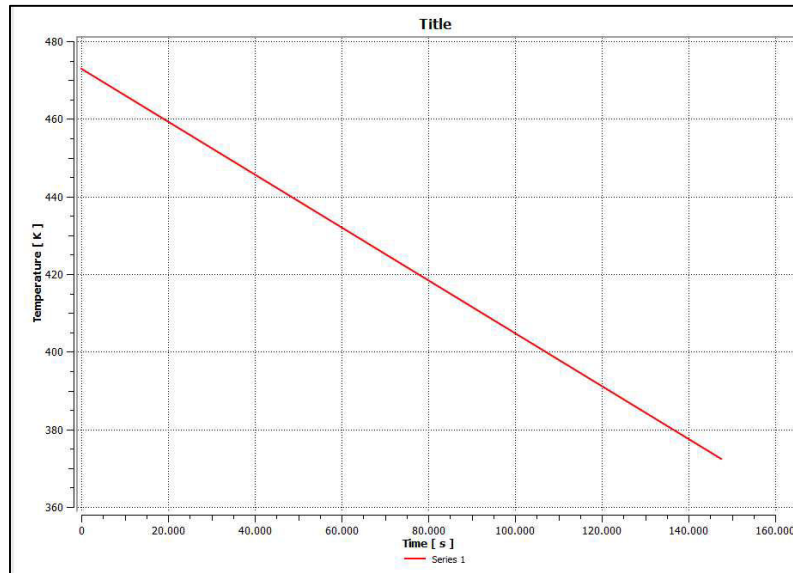
3. Pendinginan boiler dengan metode *forced cooling* menggunakan FD Fan kapasitas 40%



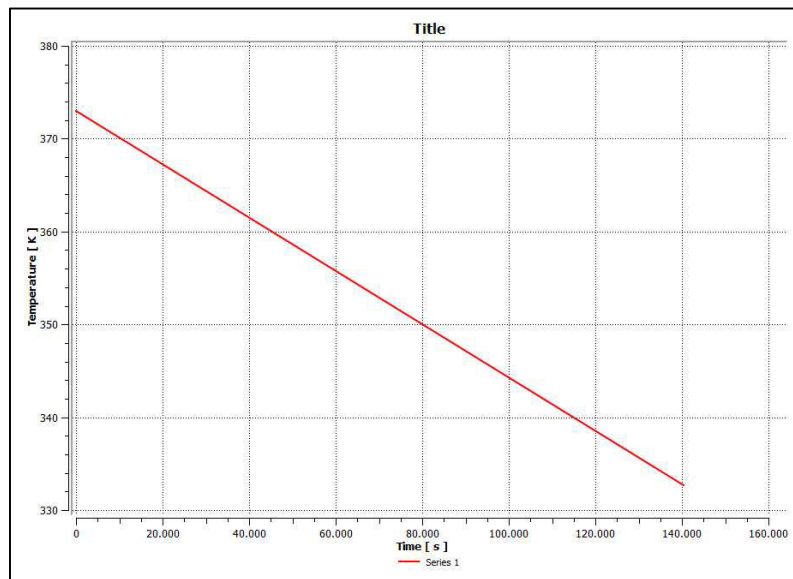
Laju penurunan temperatur vs waktu dari 540 °C ke 300 °C



Laju penurunan temperatur vs waktu dari 300 °C ke 200 °C



Laju penurunan temperatur vs waktu dari 200 °C ke 100 °C



Laju penurunan temperatur vs waktu dari 100 °C ke 60 °C

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 13 April 1982 dan merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Masa kecil sampai lulus sarjana dijalani di Surabaya dan sekitarnya. Dimulai dari TK Merah Putih, SD Merah Putih, SMPN 21, SMUN 6 di Surabaya. Pada tahun 2000 penulis melanjutkan ke jurusan Teknik Kimia, Institut Sepuluh November (ITS) Yogyakarta dan lulus pada tahun 2005. Pada tahun 2006 penulis bergabung dengan PT.

Pembangkitan Jawa Bali yang kemudian memberikan kesempatan penulis untuk melanjutkan study tingkat master di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan konsentrasi Manajemen Energi. Untuk diskusi, saran dan kritik penulis dapat dihubungi melalui email di andri@ptpjb.com