TUGAS AKHIR –TL184834

ANALISIS DISTRIBUSI *THERMAL* PADA KOMPONEN *SUPERHEATER TUBE* MATERIAL 2 ¼ CrMo PADA KONDISI *COLD*, *WARM*, DAN *HOT START*

MUHAMMAD WALID A
NRP. 02511440000107

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR−TL 184834

ANALISIS DISTRIBUSI *THERMAL* PADA KOMPONEN *SUPERHEATER TUBE* MATERIAL 2 ¼ CrMo PADA KONDISI *COLD, WARM,* DAN *HOT START*

MUHAMMAD WALID A
NRP. 02511440000107

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT−TL 184834

ANALYSIS OF THERMAL DISTRIBUTION ON SUPERHEATER TUBE COMPONENT WITH 2 ¼ CrMo MATERIAL ON COLD, WARM, AND HOT START CONDITION

MUHAMMAD WALID A
NRP. 02511440000107

Advisor
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

ANALISIS DISTRIBUSI *THERMAL* PADA KOMPONEN *SUPERHEATER TUBE* MATERIAL 2 ¼ CrMo PADA KONDISI *COLD, WARM,* DAN *HOT START*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MUHAMMAD WALID A
NRP 02511440000107

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing 1)
2. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. ..... (Pembimbing 2)

SURABAYA
Agustus 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

ANALISIS DISTRIBUSI *THERMAL* PADA KOMPONEN *SUPERHEATER TUBE* MATERIAL 2 ¼ CrMo PADA KONDISI *COLD, WARM,* DAN *HOT START*

Nama	**: Muhammad Walid A**
NRP	**: 02511440000107**
Departemen	**: Teknik Material dan Metalurgi**
Dosen Pembimbing	**: Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph. D.**
Co-Pembimbing	**: Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.**

Abstrak

Boiler merupakan bagian yang sangat penting di dalam pembangkit tenaga terutama pada kinerja dan biaya operasional. Boiler menghasilkan uap dari pembakaran bahan bakar yang dioptimalkan. Salah satu bagian boiler yang terbuka adalah superheater. Material yang digunakan pada superheater tube umumnya adalah baja paduan rendah seperti CrMo. Superheater sangat rentan terhadap beberapa tipe kerusakan seperti tegangan mekanik. Superheater merupakan bagian pada boiler yang sering rusak karena temperatur tinggi. Oleh karena itu, untuk mengetahui distribusi thermal dari variasi temperatur pada superheater tube, diperlukan analisis yang tepat. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis permodelan terhadap variasi temperatur pada superheater tube material 2 ¼ CrMo. Analisis data menggunakan metode simulasi FE pada meshing superheater dengan menggunakan data operasional yang diambil pada bulan Desember 2017 dan Januari 2018. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa bagian tube memiliki distribusi temperatur yang tidak uniform dengan nilai temperatur tertinggi sebesar 530 °C dan transisi temperatur tidak smooth pada area koneksi tube dan header disebabkan oleh faktor dimensi yang berbeda antara header dan tube.

Kata Kunci : *Superheater tube, simulasi FE, variasi temperatur, distribusi thermal, 2 ¼ CrMo*

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

ANALYSIS OF THERMAL DISTRIBUTION ON SUPERHEATER TUBE COMPONENT WITH 2 ¼ CrMo MATERIAL ON COLD, WARM, AND HOT START CONDITION

Student Name : Muhammad Walid A
NRP : 02511440000107
Department : Material and Metallurgical Engineering
Advisor : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph. D.
Co-Advisor : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Boiler is a vital element in a power plants with regards to performance and operational cost. Boiler generates steam via optimized combustion of fuels. One of the most exposed boiler parts is the superheater. Most commonly used materials on superheater tube is low alloy steel like CrMo. It is also suspectible to various types of damage such as creep, deflection, damage caused by environmental influences and mechanical loads. Superheater is the most commonly damaged part of a boiler because of high temperatur. So, to figure out thermal distribution with various temperatures on a superheater tube, require a precise analysis. In this experiment, modeling analysis will be done with various temperatures on a superheater tube with 2 ¼ CrMo material. Data analysis by using finite element method on superheater meshing by using operating data which taken from December 2017 to January 2018. From analysis results, it can be concluded that tube having non-uniform thermal distribution with the highest temperature value of 530 °C and temperature transition that is not smooth on connection area of tube and header because of difference in dimentional factor between header and tube.

Keywords : *Superheater tube, finite element method, various temperature, thermal distribution, 2 ¼ CrMo*

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kekuatan, karunia-Nya, dan shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kemampuan untuk menyelesaikan buku tugas akhir ini dengan judul **"ANALISIS DISTRIBUSI *THERMAL* PADA KOMPONEN *SUPERHEATER TUBE* MATERIAL 2 ¼ CrMo PADA KONDISI *COLD, WARM,* DAN *HOT START*"**.

Semoga dari buku tugas akhir ini bermanfaat untuk memberikan wawasan terkait penelitian mengenai distribusi *thermal* pada komponen *superheater tube*, terutama untuk material 2 ¼ CrMo. Kemudian harapannya, buku tugas akhir ini dapat menjadi refrensi untuk penelitian selanjutnya yang lebih spesifik mengenai distribusi *thermal*, atau dapat menjadi acuan untuk penelitian mengenai tegangan *thermal*.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih banyak kekurangan. Penulis memohon maaf terhadap segala kekurangan dan kekeliruan yang ada. Semoga buku tugas akhir ini bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Surabaya, Agustus 2020
Penulis

Muhammad Walid A
02511440000107

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN v
Abstrak vii
Abstract ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xvii
1 BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Batasan Masalah 2
1.5 Manfaat Penelitian 2
2 BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 *Superheater Tube* 5
2.2 *Chromium Molybdenum Steel* 5
2.2.1 2 ¼ CrMo 7
2.3 Metode Analisis Numerik 8
2.4 Kapasitas Panas 10
2.4.1 Getaran Kapasitas Panas 11
2.4.2 Ketergantungan Temperatur pada Kapasitas Panas 12
2.5 *Thermal Expansion* 13
2.5.1 *Thermal Expansion* pada Logam 15
2.5.2 *Thermal Expansion* pada Keramik 15
2.5.3 *Thermal Expansion* pada Polimer 16
2.6 Konduktivitas *Thermal* 16
2.6.1 Mekanisme Konduksi Panas 16
2.6.2 Mekanisme Konduksi Panas pada Logam 17
2.6.3 Mekanisme Konduksi Panas pada Keramik 19
2.6.4 Mekanisme Konduksi Panas pada Polimer 20
2.7 Tegangan *Thermal* 20

2.7.1 Tegangan Akibat Perluasan dan Penyusutan *Thermal* yang Tertahan..... 21
2.7.2 Tegangan Akibat Gradien Temperatur..... 21
2.7.3 *Thermal Shock* pada Material yang Rapuh..... 22
2.8 *Cold*, *Warm*, dan *Hot Start* 23
2.9 Teori *Problem Thermal-Mechanical* 25
2.9.1 *Thermal-Mechanical Finite Element*..... 25
3 BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 29
3.1 Diagram Alir Penelitian 29
3.2 Piranti Penelitian..... 30
3.3 Material..... 30
3.4 Data Input FE..... 32
3.5 Rancangan Penelitian..... 35
4 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 37
4.1 Hasil Simulasi *Thermal*..... 37
4.2 Pembahasan..... 41
5 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... 45
5.1 Kesimpulan 45
5.2 Saran 45
DAFTAR PUSTAKA 47
LAMPIRAN..... 51
UCAPAN TERIMA KASIH..... 53
BIODATA PENULIS 55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh Superheater Tube 5
Gambar 2.2 Contoh Gambar Baja *Chromium Molybdenum* 6
Gambar 2.3 Proses dan Analisis Elemen Hingga 9
Gambar 2.4 Pembentukan Gelombang *Lattice* dalam Kristal dengan Getaran Atom 11
Gambar 2.5 Ketergantungan Temperatur pada Kapasitas Panas di Volume Konstan 12
Gambar 2.6 (a) Alur Energi Potensial Banding Jarak Interatomik dengan Penambahan Temperatur (b) Kurva Alur Energi Potensial Banding Jarak Interatomik Simetris 14
Gambar 2.7 Konduktivitas *Thermal* dengan Komposisi pada Paduan *Copper-Zinc* 18
Gambar 2.8 Ketergantungan Konduktivitas *Thermal* pada Temperatur untuk Beberapa Material Keramik 20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 29
Gambar 3.2 Geometri *Superheater Tube* 30
Gambar 3.3 Input Temperatur untuk Simulasi FE dari Kondisi *Cold Start*, *Warm Start*, dan *Hot Start* 32
Gambar 3.4 *Temperature History* Selama Bulan Desember 2017 32
Gambar 3.5 *Temperature History* Selama Bulan Januari 2018 33
Gambar 3.6 *Steam Pressure History* Selama Bulan Desember 2017 33
Gambar 3.7 *Steam Pressure History* Selama Bulan Januari 2018 34
Gambar 4.1 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 1 37

Gambar 4.2 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 4 38
Gambar 4.3 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 8 39
Gambar 4.4 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 9 39
Gambar 4.5 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 11 40
Gambar 4.6 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 18 40
Gambar 4.7 Transisi Temperatur pada Area Koneksi *Tube-Header Superheater* 41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi dan Sifat-sifat Baja CrMO 7
Tabel 2.2 Komposisi dan Sifat-sifat yang Dimiliki pada Baja 2 ¼ CrMo 8
Tabel 2.3 Tabel Sifat-sifat *Thermal* pada Beberapa Logam 13
Tabel 3.1 Spesifikasi Densitas Material 2 ¼ CrMo 31
Tabel 3.2 Spesifikasi *Specific Heat* Material 2 ¼ CrMo31
Tabel 3.3 Spesifikasi *Linear Isotropic* Material 2 ¼ CrMo 31
Tabel 3.4 Spesifikasi *Thermal Expansion* Material 2 ¼ CrMo 31
Tabel 3.5 Spesifikasi Konduktivitas *Thermal* Material 2 ¼ CrMo 31
Tabel 3.6 Spesifikasi *Bilinear Isotropic* Material 2 ¼ CrMo 31
Tabel 3.7 Nilai Koefisien Konveksi 34
Tabel 3.8 Rancangan Penelitian 35

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler merupakan bagian yang sangat penting di dalam pembangkit tenaga terutama pada kinerja dan biaya operasional. *Boiler* menghasilkan uap dari pembakaran bahan bakar yang dioptimalkan (batu bara, oli dan gas, dll.) (Gupta, 2017). Boiler terdiri dari beberapa komponen yang sangat penting seperti *economizer*, *water wall*, *superheater*, dan *reheater* (Ghosh, 2015). Operasional yang bebas dari kendala dan efisien pada *boiler* sangat sulit untuk dipertahankan karena karakteristik bahan bakar yang masuk berbeda setiap waktu (Gupta, 2017).

Salah satu bagian *boiler* yang terbuka adalah *superheater*, yang merupakan tipe *heat-exchanger* yang sangat penting dibandingkan tipe *heat-exchanger* yang lain (Nad, 2016). Material yang digunakan pada *superheater tube* umumnya adalah baja paduan rendah seperti CrMo. Salah satu kelebihannya yaitu konsumsi bahan bakar yang rendah, tetapi *superheater* sangat rentan terhadap beberapa tipe kerusakan seperti *creep*, *deflection*, pengaruh dari lingkungan sekitar, dan tegangan mekanik (Nad, 2016).

Boiler tube dipengaruhi oleh lingkungan yang keras dari uap di dalam dan gas flue di luar. Satu alasan umum dari kerusakan *boiler tube* adalah tingginya temperatur pada *tube* logam daripada temperatur yang diperbolehkan. Kenaikan pada temperatur bisa disebabkan oleh pengembangan kerak pada permukaan internal/eksternal dengan paparan yang berkepanjangan pada temperatur tinggi. Terlebih lagi, pembentukan kerak menyebabkan pemanasan yang tidak seragam, menghasilkan penghambatan pada transfer panas dan penurunan efisiensi *thermal*. Hasilnya adalah korosi *fly ash* pada kerak/permukaan logam dengan temperatur *tube* logam antara 566 – 732 °C (Rajat K. Roy, 2014).

Superheater merupakan bagian pada *boiler* yang sering rusak (D. R. H. Jones, 2004). Kemudian, faktor utama penyebab

kerusakan pada *superheater* adalah temperatur 520 °C, yang menyebabkan dilatasi temperatur. Pada saat material tidak dapat menahan beban dari dilatasi, *tube* tersebut akan mengalami deformasi dan keretakan (H. Othman, 2008).

Oleh karena itu, untuk mengetahui distribusi *thermal* dari variasi temperatur pada *superheater tube*, diperlukan analisis yang tepat dengan variabel dan parameter yang efektif. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis permodelan terhadap variasi temperatur pada *superheater tube* material 2 ¼ CrMo dengan metode simulasi *finite element* (FE).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimanakah distribusi *thermal* dari variasi temperatur pada *tube*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan poin dari rumusan masalah di atas, dapat ditentukan tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis distribusi *thermal* dari variasi temperatur pada permukaan dalam (yang bersinggungan dengan fluida) *tube*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian yang telah diuraikan dan tidak menyimpang dari tujuan yang ada, maka penelitian perlu diberikan batasan masalah yang perlu, yaitu:

1. Kondisi fisik komponen *superheater tube* dianggap sempurna.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapat dari penelitian ini adalah adanya referensi untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang lebih mendalam dan spesifik terkait distribusi *thermal* pada *superheater tube*, khususnya dengan material 2 ¼ CrMo.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Superheater Tube*

Superheater Tube merupakan suatu alat untuk merubah uap basah menjadi uap kering/*superheated*. Uap kering digunakan di dalam turbin uap untuk pembangkit listrik, mesin uap, dan dalam proses seperti pembentukan uap. Terdapat tiga jenis *superheater*, yaitu *radiant*, *convection*, dan *separately fired*.

Gambar 2.1 Contoh *Superheater Tube* (EEC Group, 2007)

2.2 *Chromium Molybdenum Steel*

Chromium molybdenum alloy steel, atau disingkat *chrome moly*, adalah tipe baja *low alloy* yang digunakan di dalam berbagai industri. Sesuai namanya, paduan utamanya yaitu *chromium* (Cr) dan *molybdenum* (Mo). Paduan ini biasanya digabung dalam satu kelompok, dengan nama seperti *chrome moly*, *croalloy*, *cromalloy*, dan CrMo. Paduan ini sangat umum digunakan dalam industri

seperti pembangunan, oli dan gas, energi, dan otomotif (Masteel, 2017).

Bertahun-tahun, Mo telah menjadi standar elemen paduan yang digunakan untuk baja *anti-creep* yang dapat bertahan dalam temperatur tinggi hingga 530 °C. Karena Mo dapat menurunkan *creep-rate* pada baja, dan memperlambat koagulasi dana kasaran pada karbide saat penggunaan temperatur tinggi. Ketahanan terhadap *creep* dan cocok untuk penggunaan temperatur tinggi berarti penggunaan utama untuk baja Mo adalah di pembangkit tenaga dan pabrik petrokimia (Masteel, 2017).

Akan tetapi, konten Mo yang berlebihan untuk meningkatkan properti baja tidak akan berhasil, karena *ductility* pada *creep* menurun dengan ditambahnya Mo, dan batasan lainnya yaitu gratifisasi yang terjadi di atas 500 °C. Maka, ditemukan solusinya, yaitu dengan cara memadukan *chromium* dengan *molybdenum* yang memberikan kelebihan pada baja yang tidak dapat ditemukan pada baja Mo, dan baja CrMo merupakan baja pertama yang dapat digunakan untuk temperatur uap lebih dari 500 °C (Masteel, 2017).

Gambar 2.2 Contoh Gambar Baja *Chromium Molybdenum* (Indiamart, 2019)

Berikut merupakan komposisi dan sifat-sifat yang dimiliki pada baja *chromium molybdenum* dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi dan Sifat-sifat Baja CrMo (ASTM)

Chemistry Element – % Composition	**Mechanical Properties**	
ASTM A182, Grade 5 – 4-6% Chromium 1/2% Molybdenum With moderately corrosive fluids and in oil refineries where high temperature stability and oxidation resistance of the lower alloy steels are inadequate.		
C 0.15 Max. Mn 0.30 - 0.60 P .030 Max. S 0.015 - 0.035 Si 0.50 Max Ni 0.50 Max Cr 4.00 - 6.00 Mo 0.44 - 0.65	TS Min. psi(MPa) YS Min. psi(MPa) EL (2" Min.) RA Min. Hardness, Bhn	70,000(485) 40,000(275) 20% 35% 143-217

2.2.1 2 ¼ CrMo

2 ¼ CrMo merupakan *low alloy steel* dengan komposisi Cr dan Mo yang spesifik, yaitu kurang lebih 2,25% Cr dan 1% Mo dengan gabungan dari beberapa komposisi kimia lainnya.

Berikut merupakan komposisi dan sifat-sifat yang dimiliki pada baja 2 ¼ CrMo dalam Tabel 2.2.

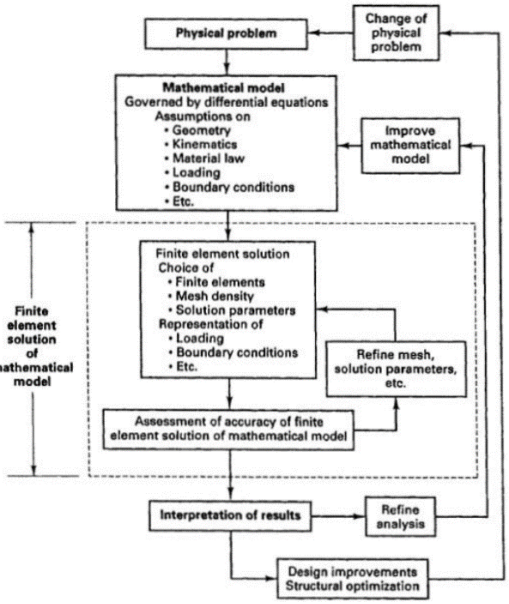
Tabel 2.2 Komposisi dan Sifat-sifat yang Dimiliki pada Baja 2 ¼ CrMo (steeldata.info)

Komposisi Kimia (%)	Sifat-sifat Mekanik	
C 0,14%	Tipe diagram	CCT
Mn 0,46%	Temperatur austenit (°C)	900
Si 0,23%	Ukuran grain	7
P 0,010%		
S 0,010%		
Cr 2,28%		
Ni 0,21%		
Mo 1,05%		
V 0,00%		

2.3 Metode Analisis Numerik

Prosedur elemen hingga saat ini banyak digunakan dalam analisa teknik, dan kita dapat mengharapkan penggunaan ini meningkat secara signifikan di tahun-tahun yang akan datang. Prosedur ini digunakan secara luas dalam analisis padatan dan struktur dan perpindahan panas dan cairan, dan memang, metode elemen hingga berguna di hampir setiap bidang analisis teknik. Pengembangan metode elemen hingga untuk solusi masalah teknik praktis dimulai dengan munculnya koputer digital. Artinya, esensi dan solusi metode elemen hingga dari masalah teknik adalah bahwa seperangkat persamaan aljabar yang mengatur didirikan dan dipecahkan, dan hanya melalui pernggunaan komputer digital proses ini dapat dianggap efektif dan dapat diterapkan secara umum. Kedua sifat efektifitas dan penerapan umum dalam analisa teknik, melekat dalam teori yang digunakan dan telah dikembangkan pada tingkat tinggi untuk perhitungan praktis, sehingga metode elemen hingga telah menemukan daya tarik yang luas dalam praktis rekayasa (Bathe, 2014).

Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan masalah fisik dalam analisis dan desain teknik. Gambar 2.3 merangkum proses analisis elemen hingga. Masalah fisik biasanya melibatkan struktur aktual atau komponen struktural yang mengalami beban tertentu. Idealisasi masalah fisik ke model matematika membutuhkan asumsi tertentu yang bersama-sama menyebabkan persamaan diferensial yang mengatur model matematika. Analisis elemen hingga memecahkan model matematika ini. Karena teknik solusi elemen hingga adalah prosedur numerik, maka perlu untuk menilai akurasi solusi. Jika kriteria akurasi tidak terpenuhi, solusi numerik harus diulangi dengan parameter solusi yang disempurnakan (sperti jerat yang halus) hingga akurasi yang cukup tercapai (Bathe, 2014).



Gambar 2.3 Proses dan Analisis Elemen Hingga (Bathe, 2014)

Tujuan umum dalam analisis elemen hingga juga adalah perhitungan estimasi kesalahan, yaitu estimasi seberapa dekat solusi elemen hingga mendekati solusi yang tepat dari solusi model matematika. Perkiraan ini menunjukkan apakah diskritisasi elemen hingga tertentu memang menghasilkan perdiksi respon yang akurat, dan seorang perancang kemudian secara rasional dapat memutuskan apakah hasil yang diberikan harus digunakan. Dalam hal hasil yang tidak dapat diterima telah diperoleh, mungkin dengan menggunakan metode elemen hingga yang tidak dapat diandalkan, tentu saja kesulitannya adalah bagaimana mendapatkan hasil yang akurat.

2.4 Kapasitas Panas

Material padat, pada saat dipanaskan, mengalami kenaikan temperatur yang menandakan bahwa sebagian energi telah diserap. Kapasitas panas merupakan sifat yang menunjukkan kemampuan material untuk menyerap panas dari lingkungan sekitar; mewakili jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan kenaikan unit temperatur. Dalam matematika, rumus kapasitas panas C adalah sebagai berikut:

$$C = dQ / dT \tag{2.1}$$

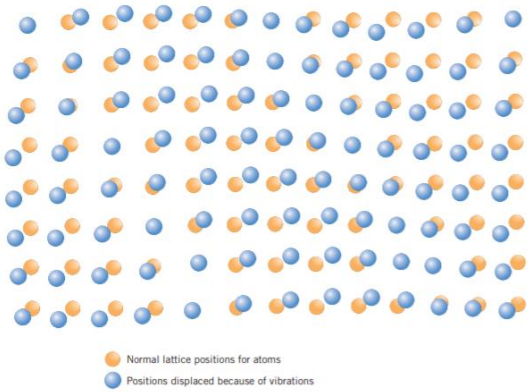
Dimana dQ adalah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan perubahan temperatur dT. Pada umumnya, kapasitas panas ditentukan per mol pada material (contoh, J/mol.K, atau cal/mol.K). *Specific heat* (c) juga sering digunakan untuk mewakili kapasitas panas per unit massa dan memiliki bermacam unit (J/kg.K, cal/g.K, Btu/lb_m.°F).

Ada dua cara untuk mengukur sifat ini, menurut kondisi lingkungan yang ada pada saat transfer panas. Salah satunya adalah kapasitas panas dengan menjaga volume spesimen konstan, C_v; lainnya yaitu dengan tekanan luar yang konstan, disebut C_p. Besarnya C_p selalu lebih besar daripada C_v; tetapi, perbedaannya

sangat kecil pada material padat pada umumnya di temperatur kamar atau dibawah temperatur kamar.

2.4.1 Getaran Kapasitas Panas

Pada benda padat, cara utama untuk penyerapan energi *thermal* adalah dengan cara meningkatkan energi getaran pada atom. Atom pada benda padat selalu bergetar pada frekuensi yang sangat tinggi dan dengan amplitudo yang kecil. Getaran pada atom yang berdekatan tidak sendiri-sendiri, melainkan dengan *atomic bonding*. Getaran-getaran ini terkoordinasikan dengan suatu cara hingga menghasilkan gelombang *lattice*, fenoma yang diwakilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pembentukan Gelombang *Lattice* dalam Kristal dengan Getaran Atom

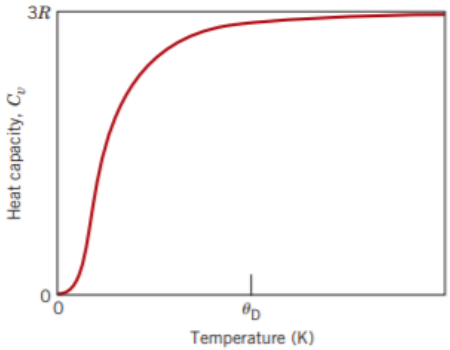
Fenomena ini dapat dianggap sebagai gelombang elastis atau hanya sebagai gelombang bunyi, memiliki panjang gelombang yang pendek dan frekuensi yang sangat tinggi, yang menyebar keseluruh kristal dengan kecepatan suara. Getaran energi *thermal* pada material terdiri dari beragam gelombang elastis ini, yang memiliki jarak distribusi dan frekuensi. Hanya nilai energi tertentu yang diperbolehkan, (energi tersebut dikatakan sebagai *quantized*) dan satu quantum dari energi

getaran disebut phonon. Terkadang, gelombang getaran itu sendiri disebut phonons.

Penyebaran *thermal* pada elektron bebas saat konduksi elektronik terjadi karena gelombang getaran, dan gelombang elastis ini juga ikut serta dalam transportasi energi saat konduksi *thermal*.

2.4.2 Ketergantungan Temperatur pada Kapasitas Panas

Variasi temperatur pada kontribusi getaran untuk kapasitas panas di volume konstan untuk kristalin padat pada umumnya ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ketergantungan Temperatur pada Kapasitas Panas di Volume Konstan

C_v adalah nol pada 0 K, tetapi akan mengalami kenaikan cepat dengan temperatur; ini berhubungan dengan meningkatnya kemampuan *lattice* untuk meningkatkan energi rata-rata mereka dengan kenaikan temperatur. Pada temperatur rendah, hubungan antara C_v dan temperatur mutlak T adalah:

$$C_v = AT^3 \qquad (2.2)$$

Dimana A adalah temperatur konstan. Di atas yang disebut temperatur *Debye* θ_D, tingkat C_v lepas dan menjadi terpisah dari

temperatur pada nilai sekitar 3R, R merupakan konstanta gas. Jadi, walaupun energi total pada material meningkat dengan temperatur, jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu derajat temperatur adalah konstan. Nilai dari θ_D adalah di bawah temperatur kamar untuk kebanyakan material padat, dan 25 J/mol.K adalah perkiraan temperatur kamar yang masuk akal untuk C_v. Tabel 2.3 menunjukkan percobaan *specific heat* pada sejumlah logam.

Tabel 2.3 Tabel Sifat-sifat *Thermal* pada Beberapa Logam

Material	C_p (J/kg.K)	α_l [(°C)$^{-1}$ × 10^{-6}]	K (W/m.K)	L [Ω.W/(K)^2 × 10^{-8}]
Aluminium	900	23,6	247	2,20
Tembaga	386	17,0	398	2,25
Emas	128	14,2	315	2,50
Besi	448	11,8	80	2,71
Nikel	443	13,3	90	2,08
Perak	235	19,7	428	2,13

2.5 *Thermal Expansion*

Material padat pada umumnya meluas saat pemanasan dan menyusut saat didinginkan. Perubahan panjang dengan temperatur untuk material padat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_f - I_0 / I_0 = \alpha_l(T_f - T_0) \quad (2.3)$$

$$\Delta I / I_0 = \alpha_l \Delta T \quad (2.4)$$

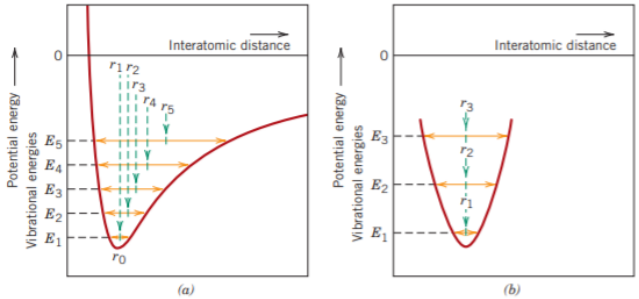
Dimana I_0 dan I_f merupakan panjang awal dan panjang akhir dengan perubahan temperatur dari T_0 ke T_f. Parameter α_l merupakan koefisien linear pada *thermal expansion*; merupakan properti material yang menunjukkan sejauh mana material meluas pada saat pemanasan dan memiliki unit temperatur timbal-balik [(°C)$^{-1}$ atau (°F)$^{-1}$]. Tentu saja, pemanasan atau pendinginan

mempengaruhi seluruh dimensi benda, dengan perubahan pada volume. Perubahan volume dengan temperatur dapat dihitung dari:

$$\Delta V / V_0 = \alpha_v \Delta T \qquad (2.5)$$

Dimana ΔV dan V_0 merupakan perubahan volume dan volume awal, dan α_v merupakan koefisien volume dari *thermal expansion*. Pada material kebanyakan, nilai dari α_v adalah anisotropik; yang tergantung pada arah kristalografi yang diukur. Untuk material yang memiliki *thermal expansion* isotropik, α_v memiliki nilai sekitar $3\alpha_1$.

Dari perspektif atom, *thermal expansion* terlihat pada peningkatan jarak rata-rata antara atom. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 (a) Alur Energi Potensial Banding Jarak Interatomik dengan Penambahan Temperatur (b) Kurva Alur Energi Potensial Banding Jarak Interatomik Simetris

Kurva dalam bentuk palung potensial energi, dan kesetimbangan jarak interatomik pada 0 K, r_0, sesuai dengan kurva palung minimum. Pemanasan dengan temperatur yang semakin tinggi (T_1, T_2, T_3, dsb.) meningkatkan energi getaran dari E_1 ke E_2 ke E_3, dan seterusnya. Amplitudo getaran rata-rata pada atom sesuai dengan lebar kurva palung pada tiap temperatur, dan jarak

interatomik rata-rata ditunjukkan dengan posisi yang meningkat dengan temperatur dari r_0 ke r_1 ke r_2, dan seterusnya.

Thermal expansion benar-benar dikarenakan oleh kurva asimetris pada palung potensial energi ini, daripada penambahan amplitudo getaran atomik dengan peningkatan temperatur. Apabila kurva potensial energi adalah simetris, seperti pada Gambar 2.6 (b), tidak akan ada perubahan pada jarak interatomik dan, akibatnya, tidak ada *thermal expansion*.

Untuk setiap kelas material (logam, keramik, dan polimer), lebih tinggi energi *atomic bonding*, lebih dalam dan lebih sempit palung potensial energinya. Hasilnya, penambahan jarak interatomik dengan peningkatan temperatur akan lebih rendah, memiliki nilai α_l yang kecil.

2.5.1 *Thermal Expansion* pada Logam

Koefisien linear pada *thermal expansion* untuk beberapa logam pada umumnya berkisar diantara 5×10^{-6} dan 25×10^{-6} $(°C)^{-1}$; nilai ini berada di tengah dalam besaran antara nilai untuk material keramik dan polimer. Beberapa *low-expansion* dan *controlled-expansion* paduan logam telah dikembangkan, yang digunakan pada aplikasi yang membutuhkan stabilitas dimensi dengan variasi temperatur.

2.5.2 *Thermal Expansion* pada Keramik

Interatomic bonding yang sangat kuat ditemukan pada material keramik pada umumnya yang terlihat pada rendahnya koefisien *thermal expansion*; memiliki nilai antara sekitar $0,5 \times 10^{-6}$ dan 15×10^{-6} $(°C)^{-1}$. Untuk keramik nonkristalin dan yang memiliki struktur kristal kubik, α_l merupakan isotropik. Selain itu, merupakan anisotropik. Untuk kaca inorganik, koefisien pada *expansion* tergantung pada komposisi. *Fused silica* (SiO_2 murni) memiliki koefisien *expansion* yang kecil, $0,4 \times 10^{-6}$ $(°C)^{-1}$. Ini dijelaskan dengan densitas susunan atom yang rendah dimana *interatomic expansion* menghasilkan perubahan dimensional makroskopik yang cukup kecil.

Material keramik yang akan dikenakan perubahan temperatur harus memiliki koefisien *thermal expansion* yang kecil dan isotropik. Selain itu, material rapuh ini akan mengalami keretakan akibat perubahan dimensional yang tidak seragam yang disebut sebagai *thermal shock*.

2.5.3 *Thermal Expansion* pada Polimer

Beberapa material polimer mengalami *thermal expansion* yang sangat tinggi pada saat pemanasan, diindikasikan dengan koefisien yang berkisar antara 50×10^{-6} dan 400×10^{-6} $(°C)^{-1}$. Nilai α_l tertinggi ditemukan di polimer linear dan bercabang karena ikatan *secondary intermolecular* yang lemah, dan jumlah *crosslink* yang rendah. Dengan meningkatnya jumlah *crosslink*, besarnya koefisien ekspansi berkurang.

2.6 Konduktivitas *Thermal*

Konduksi *thermal* merupakan fenomena yang mana panas dialirkan dari daerah temperatur tinggi menuju temperatur rendah pada suatu benda. Sifat yang mencirikan kemampuan material untuk mengalirkan panas disebut konduktivitas *thermal*. Dengan rumus sebagai berikut:

$$q = -k\, dT/dx \qquad (2.6)$$

Dimana q merupakan *heat flux*, atau aliran panas, per unit waktu per unit area (area diambil sebagai sesuatu yang tegak lurus menuju arah aliran), k adalah konduktivitas *thermal*, dan dT/dx merupakan gradien temperatur melalui medium konduksi.

Unit dari q dan k adalah W/m^2 dan W/m.K. Rumus (2.6) hanya valid pada aliran panas yang tetap, dimana *heat flux* tidak berubah dengan waktu. Lalu, tanda minus merupakan penanda arah aliran panas dari panas ke dingin, atau dibawah gradien temperatur.

2.6.1 Mekanisme Konduksi Panas

Panas dialirkan pada material padat dengan menggunakan gelombang *lattice* (*phonons*) dan elektron bebas.

Konduktivitas *thermal* dihubungkan dengan mekanisme tersebut, dan total konduktivitas adalah penjumlahan dari kedua mekanisme tersebut, atau:

$$k = k_l + k_e \tag{2.7}$$

Dimana k_l dan k_e, melambangkan konduktivitas *thermal* getaran *lattice* dan elektron. Energi *thermal* yang berhubungan dengan *phonons* atau gelombang *lattice* dialirkan menuju arah gerakan mereka. k_l dihasilkan dari gerakan *phonons* dari daerah temperatur tinggi menuju temperatur rendah pada benda yang melewati daerah gradien temperatur.

Elektron bebas ikut serta dalam konduksi *thermal* elektronik. Energi kinetik diberikan pada elektron bebas di daerah panas pada spesimen. Kemudian mereka migrasi menuju daerah dingin, dimana sebagian energi kinetik ini dialirkan menuju atom itu sendiri (sebagai energi getar) akibat dari tabrakan dengan *phonons* dalam kristal. Pemasukan relatif k_e ke jumlah total konduktivitas *thermal* bertambah dengan meningkatnya konsentrasi elektron bebas, karena lebih banyak elektron yang ada untuk ikut serta dalam proses transfer panas.

2.6.2 Mekanisme Konduksi Panas pada Logam

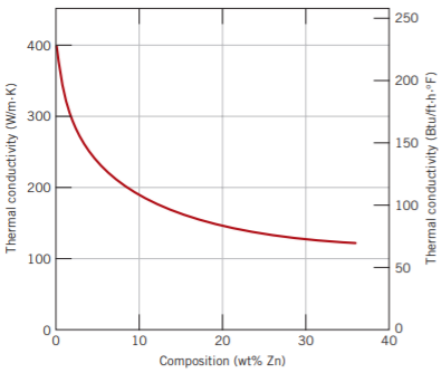
Pada logam murni, mekanisme transfer panas lebih efisien daripada kontribusi *phonon* karena elektron tidak mudah untuk menyebar dibandingkan *phonons* dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Terlebih lagi, logam merupakan konduktor panas yang sangat baik dikarenakan oleh banyaknya jumlah elektron bebas yang ikut serta dalam konduksi *thermal*. Nilai pada umumnya berkisar antara 20 dan 400 W/m.K.

Karena elektron bebas bertanggung jawab atas konduktivitas *thermal* dan listrik dalam logam murni, perlakuan secara teori disarankan untuk kedua konduktivitas dihubungkan menurut hukum *Wiedemann-Franz*:

$$L = k / \sigma T \qquad (2.8)$$

Dimana σ merupakan konduktivitas listrik, T merupakan temperatur mutlak, dan L adalah konstanta. Nilai L secara teori, $2{,}44 \times 10^{-8}$ Ω.W/(K)^2, harus tidak bergantung kepada temperatur dan sama untuk semua logam apabila energi panas dialirkan secara keseluruhan hanya dengan elektron bebas.

Paduan logam dengan kotoran menghasilkan penurunan konduktivitas *thermal*, dengan alasan yang sama bahwa konduktivitas listrik berkurang disebabkan oleh atom yang tidak murni, khususnya pada larutan padat, bertindak sebagai pusat penyebaran, menurunkan efisiensi gerakan elektron. Gambar grafik berikut merupakan konduktivitas *thermal* dengan komposisi pada paduan *copper-zinc* yang menunjukkan efek tersebut.



Gambar 2.7 Konduktivitas *Thermal* dengan Komposisi pada Paduan *Copper-Zinc*

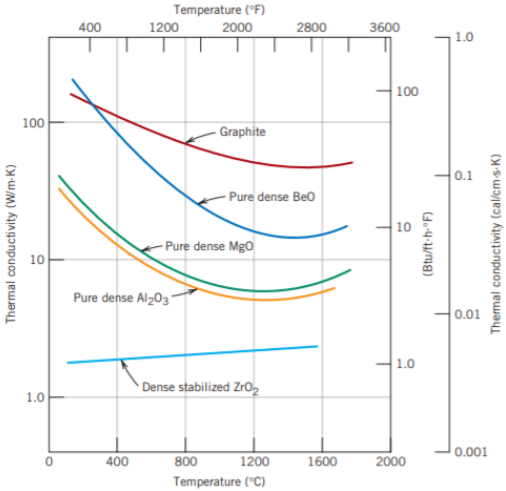
2.6.3 Mekanisme Konduksi Panas pada Keramik

Material non-logam adalah isolator *thermal* karena jumlah elektron bebas yang sedikit. Jadi, *phonons* yang bertanggung jawab untuk konduktivitas *thermal*: k_e lebih kecil daripada k_l. *Phonons* tidak seefektif elektron bebas untuk transfer energi panas dikarenakan oleh penyebaran phonon oleh kecacatan *lattice*.

Nilai konduktivitas *thermal* pada temperatur kamar berkisar antara sekitar 2 dan 50 W/m.K. Gelas kaca dan keramik *amorphous* lainnya memiliki konduktivitas yang lebih rendah daripada keramik kristalin, karena penyebaran *phonon* lebih efektif apabila struktur atom berhamburan dan tidak menentu.

Penyebaran pada getaran *lattice* lebih jelas dengan temperatur yang meningkat; oleh karena itu, konduktivitas *thermal* pada kebanyakan keramik berkurang dengan meningkatnya temperatur, setidaknya pada temperatur rendah. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8, konduktivitas mulai meningkat pada temperatur yang lebih tinggi, dikarenakan oleh transfer panas *radiant*: jumlah panas *infrared radiant* yang siginifikan dapat dialirkan melalui material keramik transparan. Efisiensi proses ini meningkat dengan temperatur.

Porositas dalam material keramik dapat mempengaruhi konduktivitas *thermal*; meningkatkan volume *pore* akan, dalam kebanyakan kondisi, menghasilkan penurunan konduktivitas *thermal*. Bahkan, banyak keramik yang digunakan sebagai isolator *thermal* merupakan *porous*. Transfer panas melewati *pore* sangat lambat dan tidak efisien. *Pore* bagian dalam biasanya berisi udara, yang memiliki konduktivitas *thermal* yang sangat rendah, sekitar 0,02 W/m.K.



Gambar 2.8 Ketergantungan Konduktivitas *Thermal* pada Temperatur untuk Beberapa Material Keramik

2.6.4 Mekanisme Konduksi Panas pada Polimer

Konduktivitas *thermal* untuk polimer pada umumnya adalah sekitar 0,3 W/m.K. Untuk material ini, transfer energi dilakukan dengan cara getaran dan rotasi pada rantai molekul. Besaran konduktivitas *thermal* tergantung pada tingkat kristalinitas; polimer dengan tingkat kristalinitas yang tinggi dan struktur yang tersusun dengan baik akan memiliki konduktivitas yang lebih baik daripada material *amorphous* yang sebanding. Ini dikarenakan oleh koordinasi getaran yang efektif pada rantai molekul dalam keadaan kristalin.

Polimer biasanya digunakan untuk isolator *thermal* karena konduktivitas *thermal* yang rendah. Untuk keramik, sifat isolator mereka dapat ditingkatkan dengan penambahan *pore* kecil, yang biasanya ditambahkan dengan cara *foaming*.

2.7 Tegangan *Thermal*

Tegangan thermal adalah tegangan pada suatu material dikarenakan oleh perubahan temperatur. Pemahaman asal-usul dan

sifat dari tegangan thermal sangat penting karena tegangan ini dapat menyebabkan retak atau deformasi plastik yang tidak diinginkan.

2.7.1 Tegangan Akibat Perluasan dan Penyusutan *Thermal* yang Tertahan

Misalkan sebuah batang padat yang homogen dan isotropik dipanaskan atau didinginkan secara tidak merata. Untuk perluasan atau penyusutan yang lepas, batang akan bebeas dari tegangan. Tetapi, apabila gerakan *axial* pada batang ditahan oleh penampang yang kaku, tegangan *thermal* akan terjadi. Besarnya tegangan σ dari perubahan temperatur dari T_0 ke T_1 adalah:

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_1) = E\alpha_1\Delta T \qquad (2.9)$$

Dimana E merupakan modulus elastisitas dan α_l merupakan koefisien linear pada perluasan *thermal*. Pada saat pemanasan ($T_f > T_0$), tegangan mengalami penekanan ($\sigma < 0$), karena perluasan batang telah ditahan. Tentu saja, apabila spesimen batang didinginkan ($T_f < T_0$), akan terjadi tegangan tarik ($\sigma > 0$). Juga, tegangan pada rumus 2.2 adalah sama dengan tegangan yang dibutuhkan untuk menekan (atau elongasi) secara elastis sebuah spesimen batang kembali pada panjang awalnya setelah dibiarkan mengalami perluasan (atau penyusutan) dengan perubahan temperatur $T_0 - T_f$.

2.7.2 Tegangan Akibat Gradien Temperatur

Pada saat benda padat dipanaskan atau didinginkan, distribusi temperatur internal akan tergantung pada ukuran dan bentuk benda tersebut, konduktivitas *thermal* pada material, dan laju perubahan temperatur. Tegangan *thermal* kemungkinan dapat terjadi akibat gradien temperatur pada benda, yang sering terjadi karena pemanasan atau pendinginan cepat, dimana perubahan temperatur pada bagian luar benda lebih cepat daripada bagian dalam benda; perbedaan perubahan dimensi menahan perluasan atau penyusutan bebas pada volume elemen

yang berdekatan di dalam bagian benda. Contoh, pada saat pemanasan, bagian terluar dari spesimen menjadi panas, dan kemudian, akan mengalami perluasan yang lebih daripada bagian dalam. Maka, terjadi tegangan tekan permukaan dan diimbangi oleh tegangan tarik bagian dalam. Kondisi tegangan kemudian dibalik untuk pendinginan cepat dimana bagian permukaan akan mengalami tegangan tarik.

2.7.3 *Thermal Shock* pada Material yang Rapuh

Untuk logam lunak dan polimer, pengurangan tegangan akibat *thermal* dapat dilakukan dengan deformasi plastik. Tetapi, sifat *nonductility* pada keramik pada umumnya meningkatkan kemungkinan untuk patah dari tegangan ini. Pendinginan secara cepat pada benda yang rapuh kemungkinan dapat menyebabkan *thermal shock* daripada pemanasan, karena tegangan permukaan yang terpengaruh merupakan tegangan tarik. Pembentukan retakan dan penyebarannya pada permukaan lebih memungkinkan apabila tegangan yang terjadi adalah tegangan tarik.

Kapasitas sebuah material untuk menahan kegagalan seperti ini disebut *thermal shock resistance*. Untuk benda keramik yang didinginkan secara cepat, daya tahan pada *thermal shock* bergantung tidak hanya pada besarnya perubahan temperatur, tetapi juga pada sifat mekanik dan *thermal* pada material. *Thermal shock resistance* sangat baik pada keramik yang memiliki kekuatan retak tinggi σ_f dan konduktivitas *thermal* yang tinggi, kemudian juga memiliki modulus elastisitas yang rendah dan koefisien *thermal expansion* yang rendah. Daya tahan material dengan jenis kegagalan seperti ini dapat dihitung dengan parameter *thermal shock resistance* TSR:

$$TSR = \sigma_f k / E\alpha_l \qquad (2.10)$$

Thermal shock dapat dicegah dengan cara mengubah kondisi terluar benda hingga laju pendinginan atau pemanasan berkurang

dan gradien temperatur pada benda diminimalisir. Modifikasi *thermal* dan/atau karakteristik material pada rumus 2.3 dapat meningkatkan *thermal shock resistance* pada material. Pada parameter ini, koefisien *thermal expansion* adalah yang paling mudah untuk diganti dan dikendalikan. Contoh, Kaca soda-lime pada umumnya, yang memiliki α_1 sekitar 9×10^{-6} (°C)$^{-1}$, sangat rentan terhadap *thermal shock*. Dengan mengurangi jumlah CaO dan Na_2O dan pada saat yang bersamaan menambah B_2O_3 dengan jumlah yang cukup untuk membentuk kaca *borosilicate* (atau *Pyrex*) yang akan mengurangi koefisien perluasan menjadi sekitar 3×10^{-6} (°C)$^{-1}$; material ini sangat cocok untuk siklus pemanasan dan pendinginan pada oven dapur. Penambahan pori besar yang banyak atau *ductile second phase* juga dapat meningkatkan karakteristik *thermal shock* pada material; keduanya dapat memperlambat laju penyebaran retak akibat *thermal*.

Sangat dianjurkan untuk menghilangkan tegangan *thermal* pada keramik untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan karakteristik secara kasat mata. Ini dapat dicapai dengan perlakun panas *annealing*.

2.8 *Cold, Warm,* dan *Hot Start*

Prosedur *start-up* turbin bergantung pada *casing* dan temperatur *rotor*. Karena turbin terpapar oleh temperatur dan tekanan tinggi yang cukup lama, diharuskan untuk terdapat ekspansi dan panas yang seragam pada seluruh permukaan turbin. Jika tidak, karena panas yang tidak seragam, ekspansi yang tidak seragam akan muncul yang akan mengakibatkan deformasi permanen pada *rotor* turbin atau kegagalan parah yang lain. Berikut merupakan perbedaan dari prosedur *start-up* (Soni, 2016).

1. *Cold start-up*: Prosedur ini dilakukan jika turbin dalam keadaan berhenti atau *stand by* selama lebih dari 20 jam. Disini *barring gear* akan *running* selama 4 jam sebagai *warm up* turbin (temperatur turbin naik) yang akan selesai dengan menaikkan *vacuum* melalui *grand sealing*.

Prosedur ini akan berjalan selama 5 jam untuk membawa turbin dari 0 menuju rpm yang diinginkan.

2. *Warm start-up*: Prosedur ini dilakukan jika turbin dibawa menuju kondisi *barring*, dan dalam keadaan tersebut selama 8 – 10 jam dan temperatur *casing* dijaga. Disini *barring gear* akan *running* dan *gland sealing* akan disejajarkan untuk *warm up*. Prosedur ini akan berjalan selama kurang lebih 40 menit untuk membawa turbin dari *barring* rpm menuju rpm yang diinginkan.
3. *Hot start-up*: Prosedur ini dilakukan jika turbin dibawa menuju kondisi *barring*, dan dalam keadaan tersebut selama kurang dari 6 jam dan temperatur *casing* dijaga. Disini *barring gear* akan *running* dan *gland sealing* akan disejajarkan untuk *warm up*. Prosedur ini akan berjalan selama kurang lebih 25 menit untuk membawa turbin dari *barring* rpm menuju rpm yang diinginkan.

Terlebih lagi, yang telah dijelaskan merupakan prosedur untuk manufaktur tertentu, untuk manufaktur yang lain mungkin akan berbeda. Tetapi pada umumnya adalah (Soni, 2016).

1. Prosedur yang dilakukan berdasarkan waktu total turbin berhenti.
   Cold start-up > *Warm start-up* > *Hot start-up*
2. Waktu yang dibutuhkan untuk menyalakan turbin.
   Cold start-up > *Warm start-up* > *Hot start-up*

Dalam unit 250 MW biasanya digunakan HPT (*High Pressure Turbine*) *casing mid metal temperature* sebagai acuan untuk tipe *start-up* (Meena, 2020).

1. Saat HPT *casing mid metal* kurang dari 150 °C maka menggunakan *cold start-up*.
2. Saat HPT *casing mid metal* di antara 150 - 350 °C maka menggunakan *warm start-up*.
3. Saat HPT *casing mid metal* di atas 350 °C maka menggunakan *hot start-up*.

Pada *cold start-up*, waktu maksimum akan diambil dari awal menyala hingga *synchronize*. Dibutuhkan waktu sekitar 7 – 9 jam untuk mesin KWU 250 MW (Meena, 2020).

2.9 Teori *Problem Thermal-Mechanical*

2.9.1 *Thermal-Mechanical Finite Element*

Problem yang melibatkan termal dan mekanikal dapat dipecahkan dengan metode *finite element* (FE). Persamaan FE untuk analisis *coupled* tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$[\mathrm{C}]\left\{\dot{T}\right\}+[\mathrm{K}]\{T\}=\{F_T\} \tag{2.11}$$

Dimana:

$$[\mathrm{C}]=\int_V \rho c[\mathrm{N}]^T[\mathrm{N}]dV \tag{2.12}$$

$$[\mathrm{K}]=\int_V k[\mathrm{B}]^T[\mathrm{B}]dV+\int_S h_f[\mathrm{N}]^T[\mathrm{N}]dS \tag{2.13}$$

$$\left\{F_T\right\}=\int_V \mathrm{Q}[\mathrm{N}]^T dV+\int_S h_f T_{ref}[\mathrm{N}]^T dS \tag{2.14}$$

[N] adalah matriks dari *shape functions*, [B] adalah matriks dari turunan *shape functions*, dan $\{T\}$ adalah vektor dari nodal temperatur.

Selanjutnya, dengan memperhitungkan temperatur tersebut beserta efek plastisitas persamaan FEM dapat ditulis lebih lanjut:

$${}^{i+1}[\mathrm{K}_1]\{\Delta U\}-{}^{i+1}[\mathrm{K}_2]\{\Delta T\}={}^{i+1}\{R\}-{}^{i}\{R\} \tag{2.15}$$

Dimana:

$$[K_1] = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] dV \tag{2.16}$$

$$[K_2] = \int_V [B]^T [C^{th}] [M] dV \tag{2.17}$$

$$\{R\} = \int_S [N]^T \{p\} dS + \int_V [N]^T \{f\} dV \tag{2.18}$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \tag{2.19}$$

$\{\Delta U\}$ dan $\{\Delta T\}$ masing-masing adalah *incremental* dari *nodal displacements and temperature*, [B] adalah matriks dari *strain-displacement*, $[D^e]$ adalah matriks dari *elastic stiffness*, $[D^p]$ adalah matriks dari *plastic stiffness*, [C] adalah matriks dari *thermal stiffness*, [M] adalah *temperature shape function*, $\{p\}$ adalah vektor dari *traction*, $\{f\}$ adalah vektor dari *body force* dan *i* menunjukkan langkah analisis sekarang.

Vektor dari *nodal displacement* diupdate pada tahap selanjutnya, ${}^{i+1}\{U\}$ sebagai berikut:

$${}^{i+1}\{U\} = {}^{i}\{U\} + \{\Delta U\} \tag{2.20}$$

Selanjutnya, update dari kondisi tegangan di dalam material akan didapatkan sebagai berikut:

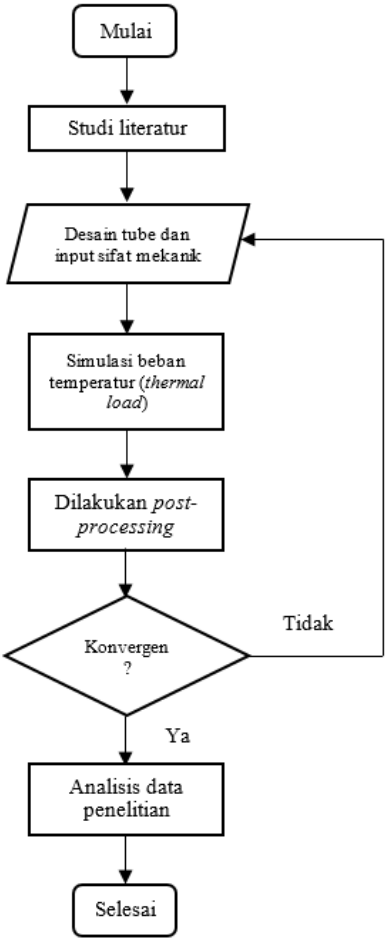
$${}^{i+1}\{\sigma\} = {}^{i}\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\} \tag{2.21}$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D^{ep}][B]\{\Delta U\} + [C][M]\{\Delta T\} \tag{2.22}$$

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Piranti Penelitian

Terdapat satu perangkat komputer yang digunakan dalam simulasi pada komponen superheater ini, yaitu *Personal Computer* (PC) yang digunakan untuk simulasi distribusi *thermal* pada *superheater tube* yakni laptop dengan spesifikasi RAM 8192 MB, CPU Intel® Core i7 7th *generation Quad-core* @ ~2.9 GHz dan Windows 10 Pro x64.

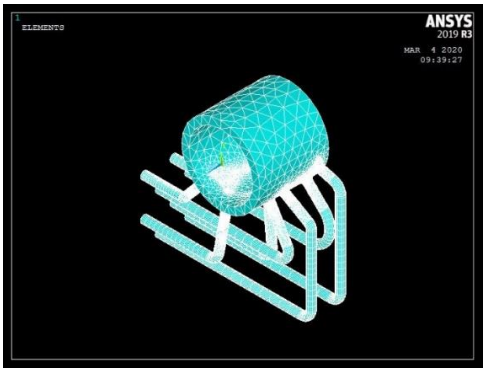
Sedangkan untuk perangkat lunak yang digunakan terdapat satu jenis, yaitu ANSYS 19.3 x64 dengan modul ANSYS *Workbench* 19.3 untuk simulasi distribusi *thermal*.

3.3 Material

Data geometri *header* dan *tube superheater* tersebut adalah sebagai berikut:

- Diameter luar *header* :323,9 mm
- Tebal *header* :30 mm
- Diameter luar *tube* :31,8 mm
- Tebal *tube* :3 mm

Berikut merupakan *meshing* dari *superheater* material 2 ¼ CrMo dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Geometri *Superheater Tube*

Berikut merupakan spesifikasi dari material 2 ¼ CrMo tercantum dalam beberapa tabel berikut ini.

Tabel 3.1 Spesifikasi Densitas Material 2 ¼ CrMo

	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	400	500
Densitas (kg/m^3)	7850	7850	7850	7850

Tabel 3.2 Spesifikasi *Specific Heat* Material 2 ¼ CrMo

	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	400	500
C	461	517	538	556

Tabel 3.3 Spesifikasi *Linear Isotropic* Material 2 ¼ CrMo

	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	400	500
YM (Pa)	$2{,}1\times10^{11}$	$1{,}92\times10^{11}$	$1{,}84\times10^{11}$	$1{,}76\times10^{11}$
Poisson ratio	0,3	0,3	0,3	0,3

Tabel 3.4 Spesifikasi *Thermal Expansion* Material 2 ¼ CrMo

	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	400	500
TE (1/ °C)	$1{,}15\times10^{-5}$	$1{,}29\times10^{-5}$	$1{,}35\times10^{-5}$	$1{,}39\times10^{-5}$

Tabel 3.5 Spesifikasi Konduktivitas *Thermal* Material 2 ¼ CrMo

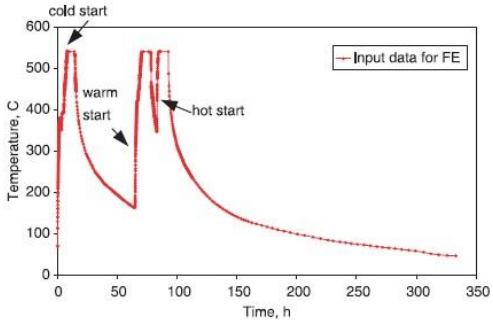
	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	400	500
TC (W/m °C)	48,5	43,1	39,9	38,6

Tabel 3.6 Spesifikasi *Bilinear Isotropic* Material 2 ¼ CrMo

	T1	T2	T3	T4
Temperatur (°C)	20	300	450	500
YS (Pa)	$4{,}4\times10^{8}$	$1{,}95\times10^{8}$	$1{,}49\times10^{8}$	$1{,}4\times10^{8}$
TM (Pa)	$8{,}9\times10^{8}$	$9{,}7\times10^{8}$	$7{,}1\times10^{8}$	$8{,}4\times10^{8}$

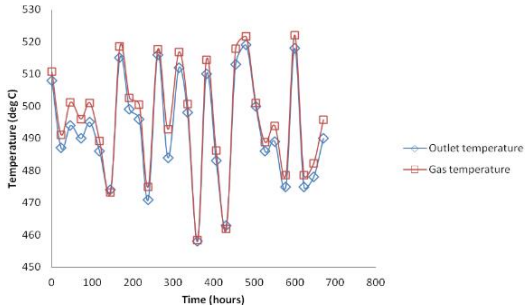
3.4 Data Input FE

Data *cold start*, *warm start*, dan *hot start* yang digunakan sebagai data *input* simulasi FE ditunjukkan dalam Gambar 3.3.

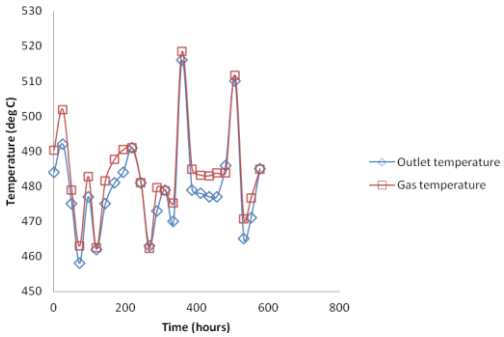


Gambar 3.3 Input Temperatur untuk Simulasi FE dari Kondisi *Cold Start*, *Warm Start*, dan *Hot Start*

Nilai temperatur maksimum diambil sebesar 530 °C karena ini merupakan limit temperatur bagi material 15Mo3. Data operasional yang ada juga menunjukkan bahwa temperatur operasional bekerja dibawah 530 °C. Data operasional yang diambil adalah pada bulan Desember 2017 dan Januari 2018, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan 3.5.

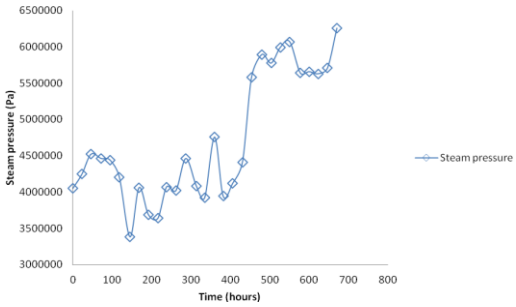


Gambar 3.4 *Temperature History* Selama Bulan Desember 2017

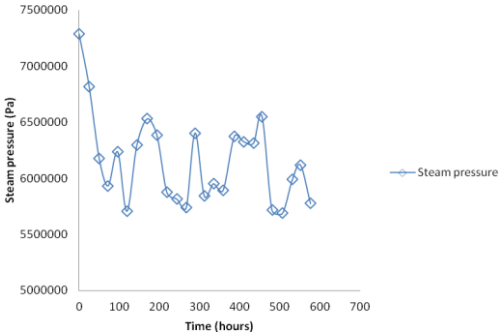


Gambar 3.5 *Temperature History* Selama Bulan Januari 2018

Data operasional *steam pressure* ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan 3.7 berikut. Nilai maksimumnya adalah 7,29 MPa pada bulan Januari 2018 dan minimum sebesar 3,38 Mpa pada bulan Desember 2017.



Gambar 3.6 *Steam Pressure History* Selama Bulan Desember 2017



Gambar 3.7 *Steam Pressure History* Selama Bulan Januari 2018

Nilai koefisien konveksi *h* diambil sebagai berikut:

Tabel 3.7 Nilai Koefisien Konveksi

h_{conv}(W/m^{2}k)	Nilai
Steam to tube/header metal	3300
Tube/header metal to air	50

Untuk efisiensi simulasi FE, selanjutnya input temperatur seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 tersebut dibagi menjadi 18 *load steps* (LS).

3.5 Rancangan Penelitian

Berikut ini merupakan rancangan penelitian untuk analisis distribusi *thermal* pada komponen *superheater tube* material 2 ¼ CrMo dalam Tabel 3.8. Untuk tekanan fluida sama pada tiap variasi temperatur yaitu sebesar 16,7 Mpa.

Tabel 3.8 Rancangan Penelitian

Variasi: Temperatur (°C)	Output: Distribusi *Thermal*	Keterangan
Cold start (70-530)		
Warm start (165-530)		
Hot start (350 turun ke 48)		

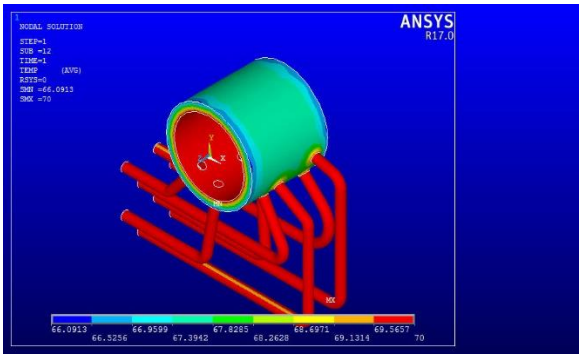
(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

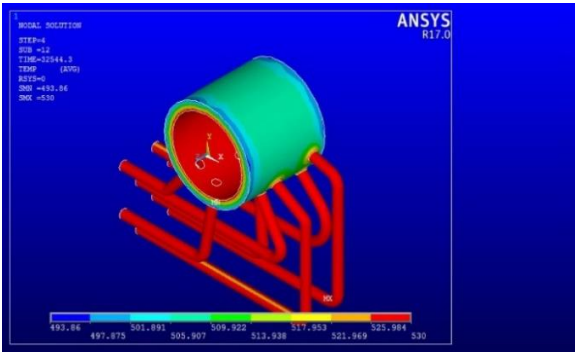
4.1 Hasil Simulasi *Thermal*

Time instant yang di-*capture* di sini adalah waktu awal *cold start* dengan temperatur 70 °C (LS 1), waktu *cold start* dengan temperatur 530 °C (LS 4), waktu awal *warm start* dengan temperatur 165 °C (LS 8), waktu *warm start* dengan temperatur 530 °C (LS 9), waktu awal *hot start* dengan temperatur 350 °C (LS 11) dan waktu akhir dengan temperatur 48 °C (LS 18), dengan mengacu pada Gambar 3.3 tersebut di atas. Nilai-nilai *stress* yang diambil bersesuaian dengan waktu-waktu atau *load step* (LS) di atas.

Berikut merupakan hasil simulasi distribusi *thermal* pada kondisi *cold start* (LS 1 dan LS 4) dalam Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



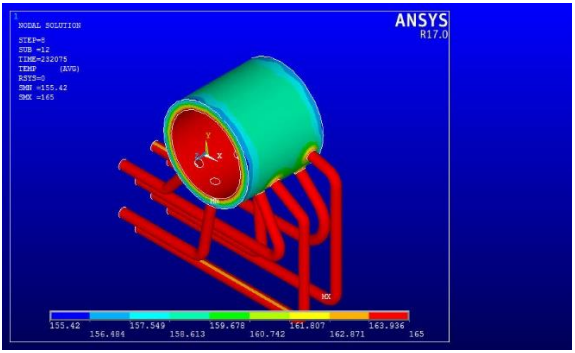
Gambar 4.1 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 1



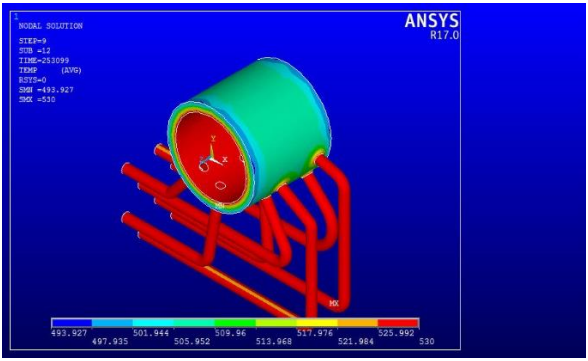
Gambar 4.2 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 4

Dari simulasi LS 1 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 66,0913 °C dan permukaan dalam dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling tinggi yaitu sebesar 70 °C. Kemudian pada simulasi LS 4 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 493,86 °C dan permukaan dalam dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling tinggi yaitu sebesar 530 °C.

Berikut merupakan hasil simulasi distribusi *thermal* pada kondisi *warm start* (LS 8 dan LS 9) dalam Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 8

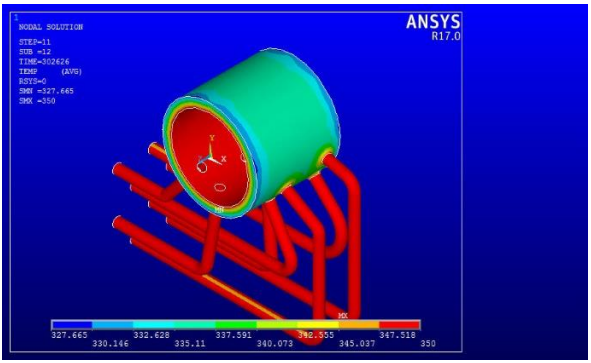


Gambar 4.4 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 9

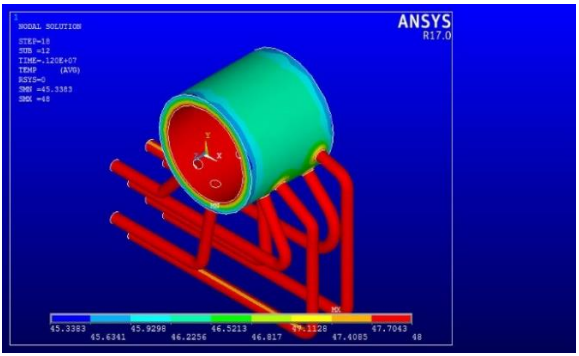
Dari simulasi LS 8 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 155,42 °C dan permukaan dalam dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling tinggi yaitu sebesar 165 °C. Kemudian pada simulasi LS 9 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 493,927 °C dan permukaan dalam

dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling tinggi yaitu sebesar 530 °C.

Berikut merupakan hasil simulasi distribusi *thermal* pada kondisi *hot start* (LS 11 dan LS 18) dalam Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 11

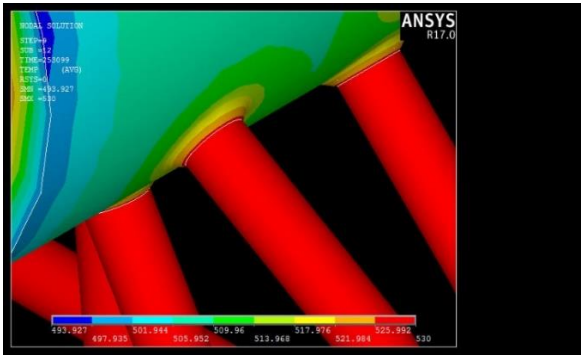


Gambar 4.6 Distribusi Temperatur *Tube* dan *Header* saat LS 18

Dari simulasi LS 11 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 327,665 °C dan permukaan dalam dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling

tinggi yaitu sebesar 350 °C. Kemudian pada simulasi LS 18 dapat dilihat bahwa bagian ujung terluar dari *header* memiliki temperatur yang paling rendah yaitu sebesar 45,3383 °C dan permukaan dalam dari *header* yang bersinggungan langsung dengan fluida dan *tube* memiliki temperatur yang paling tinggi yaitu sebesar 48 °C.

Untuk *view* yang lebih jelas, Berikut merupakan Gambar 4.7 yang menunjukkan distribusi temperatur dan transisinya di area koneksi *tube* dan *header*. Dapat terlihat dengan jelas bahwa transisi temperatur dari *header* ke *tube* tidak *smooth* pada *design* ini.



Gambar 4.7 Transisi Temperatur pada Area Koneksi *Tube-Header Superheater*

4.2 Pembahasan

Gambar 4.1 – 4.6 di atas menunjukkan distribusi temperatur pada awal waktu atau LS 1 sampai dengan LS 18 sebagaimana yang telah disebutkan di atas. Pada umumnya, pola profil temperatur sama dan hanya berbeda pada nilai temperaturnya. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa bagian *tube* memiliki distribusi temperatur yang paling tinggi (warna merah di hampir seluruh arah ketebalan), dan transisi temperatur tidak *smooth* pada area koneksi *tube* dan *header*, seperti yang terlihat pada Gambar 4.7. *Tube* terpapar temperatur yang paling tinggi sedangkan bagian terluar *header* terpapar temperatur yang lebih rendah. Ini disebabkan oleh perbedaan geometri antara *tube* dan *header*, terutama pada bagian

ketebalan antara *tube* dan *header*. Karena ketebalan *tube* cukup kecil, maka bagian terdalam dan terluar *tube* terpapar temperatur tinggi, sedangkan pada bagian *header* ketebalannya cukup besar sehingga bagian terluar pada *header* tidak terpapar temperatur yang paling tinggi. Karena perbedaan temperatur yang cukup signifikan pada koneksi antara *tube* dengan bagian terluar *header*, terjadilah transisi temperatur yang tidak *smooth*. Dengan demikian akibat faktor dimensi, secara umum tegangan pada *tube* bernilai lebih besar. Selain itu, konsentrasi tegangan *thermal* akan timbul pada area koneksi *tube-header*.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang bisa diambil adalah:

1. Bagian tube memiliki distribusi temperatur yang lebih tinggi (warna merah di hampir keseluruhan arah ketebalan). Kemudian yang menyebabkan temperatur yang paling tinggi yaitu pada saat *cold start* (LS 4) dan *warm start* (LS 9) dengan nilai temperatur sebesar 530 °C.
2. Transisi temperatur tidak *smooth* pada area koneksi *tube* dan *header* disebabkan oleh faktor dimensi yang berbeda antara *header* dan *tube*.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, maka saran yang dapat diberikan yaitu:

1. Penelitian ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk penelitian berikutnya, terutama untuk analisis tegangan *thermal* pada area koneksi *tube-header*.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR PUSTAKA

Bathe, Klaus-Jurgen. 1996. **Finite Element Procedures**. USA: Prentice-Hall, Inc.

Bathe, Klaus-Jurgen. 2014. **Finite Element Procedure**. Massachussets: Pearson Education, Inc.

Callister Jr, William D. 2009. **Materials Science and Engineering an Introduction Eighth Edition**. USA.

Felkowski, Lukasz. 2018. **Analysis of Superheater Tubes Failure**. Poland: Sumitomo SHI FW Energia Polska.

Ghosh, D. 2015. **Failure Investigation of Radiant Platen Superheater Tube of Thermal Power Plant Boiler**. Durgapur: NDT & Metallurgy Group, CMERI.

Gupta, Gagan Kumar. 2017. **Critical Failure Analysis of Superheater Tube of Coal-Based Boiler**. India: Indian Institute of Technology.

Jawad, M.H dan Jetter, R.I. 2009. **Design and Analysis of ASME Boiler and Pressure Vessel Components in the Creep Range**. USA: American Society of Mechanical Engineering (ASME) Press.

Masteel. 2017. **Why Chromium Molybdenum Alloy Steel is the Material of Choice for High Temperature Application**, <URL: https://www.masteel.co.uk/news/chromium-molybdenum-high-temperature-applications>.

Meena, S. R. 2020. **What is the Meaning & Definition of Cold Start, Hot Start & Warm Start of Steam Turbine?**, <URL: https://www.quora.com/What-is-the-meaning-definition-of-Cold-start-hot-start-warm-start-of-steam-turbine>.

Nad, Martin. 2016. **Root-Cause Analysis of Superheater-Tube Failure**. Brno: Brno University of Technology.

PJB. 2017. **Data Operasi Blok 2**. Gresik: PJB Gresik.

Rot, Rajat K. 2014. **Analysis of Superheater Boiler Tubes Failed through Non-linear Heating**. Jamshedpur: MST Division, CSIR-National Metallurgical Laboratory Burma Mines.

Soni, Udit. 2016. **What is the Meaning & Definition of Cold Start, Hot Start & Warm Start of Steam Turbine?**, <URL: https://www.quora.com/What-is-the-meaning-definition-of-Cold-start-hot-start-warm-start-of-steam-turbine>.

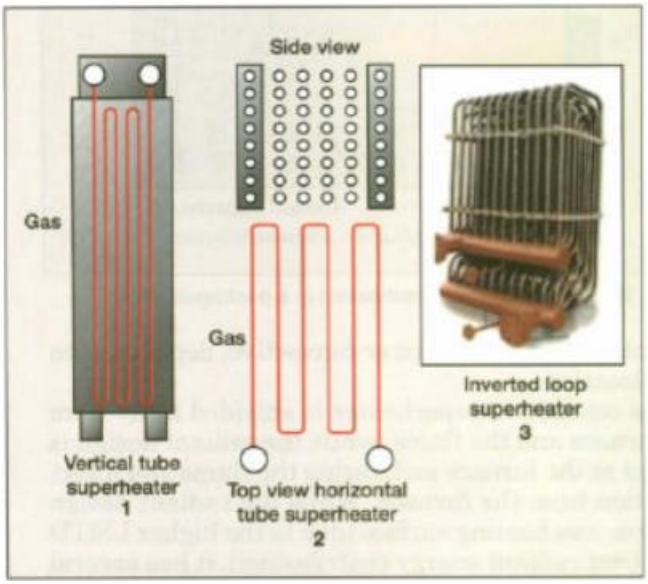
Steeldata. 2019. **Transformation Diagram 2 1/4Cr-1Mo Steel**, <URL: https://steeldata.info/std/demo/data/2693.html>.

Wiley, John. 2015. **Appendix E. Pressure Vessels and Piping Overpressure Considerations**. USA: American Institute of Chemical Engineers, Inc.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Skematik Superheater



(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis merasa selama proses pengerjaan tugas akhir menemui banyak sekali kesulitan namun semuanya dapat dilewati karena pertolongan Allah SWT serta dukungan dari orang-orang disekitar penulis. Sehingga penulis mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada:

1. Orang tua penulis, Ibu Suharti dan Bapak Abdul Rachman, atas dukungan serta doa-doa yang dilangitkan guna memperlancar penulis serta senantiasa mendukung dan memotivasi penulis dikala mengalami putus asa dan kelelahan.
2. Adik penulis, Muhammad Akrom Al-Baihaqi, Muhammad Fakhar Al-Ghifariz, Almira Qaireen Khairunnisa, yang senantiasa mendukung penulis.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat selaku dosen wali dan pembimbing 1 yang telah memberikan waktu dan juga pikiran kepada penulis untuk mengarahkan tugas akhir, serta memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Ibu Widyastuti selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan nasihat dan memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Teman-teman MT16, terutama Ejak dan Adnan, dan teman-teman yang selalu memberikan semangat dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Daniel Arya Wikananindita yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Bapak dan Ibu Dosen di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS yang telah memberikan ilmu dan pengalaman berharga ketika kuliah.
8. Serta seluruh komponen lainnya yang telah berpartisipasi namun belum sempat penulis masukkan ke dalam lembaran ini.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Muhammad Walid Al Ghandrie dengan nama panggilan Walid. Lahir di Bontang pada tanggal 22 Agustus 1994, merupakan anak pertama dari Bapak Abdul Rachman dan Ibu Suharti. Penulis mengawali jenjang pendidikan di TK Vidatra, SD Vidatra, SMP Ar-Rohmah, dan SMA Vidatra. Kemudian penulis melanjutkan jenjang Pendidikan S1 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi pada tahun 2014. Selama berkuliah penulis aktif mengikuti beberapa kegiatan namum paling aktif dalam pengurus inti himpunan daerah, Himpunan Mahasiswa Bontang. Berikut merupakan email penulis yaitu mwalidag@gmail.com