

# Analisis Sisa Umur Pakai *Tube Heater* Pada *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG)

D.Wahyudi\* dan P.T. Iswanto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia  
e-mail: \*danan.wahyudi@gmail.com

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sisa umur pakai material pipa baja karbon SA 106 C yang digunakan sebagai *tube heater* pada *heat recovery steam generator* (HRSG) setelah dilakukan *major overhaul*. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah menganalisis *stress rupture test* sejumlah spesimen yang kemudian diplot pada kurva Larson-Miller parameter (PLM) dan dilakukan ekstrapolasi. Dalam plotting kurva PLM menggunakan 2 nilai konstanta yaitu 20 (ASM Handbook, 2000) dan 15,6 (API STANDARD 530, 2015). Hasil analisis didapatkan sisa umur pakai pada tekanan dan temperatur desain menggunakan metode PLM dengan nilai konstanta 20 dan 15,6 adalah 3.253 jam dan 1.425 jam. Perhitungan sisa umur pakai menggunakan metode PLM dengan nilai konstanta berdasarkan API 530 lebih konservatif.

**Kata kunci:** Baja karbon, *heat recovery steam generator*, *stress rupture test*, *Larson-Miller parameter*.

## Abstract

This research aims to investigate the remaining life of the SA 106 C carbon steel pipe which is used as a heating pipe in the heat recovery steam generator (HRSG) after a major overhaul. The method used in this research is by evaluating a stress rupture test of some specimens which are then plotted on the Larson-Miller parameter (PLM) curve and extrapolated. In plotting the PLM curve, two constant values are used, the first is 20 (ASM Handbook, 2000) and the second is 15.6 (API STANDARD 530, 2015). The result show that the remaining service life at design pressure and temperature using the PLM method with constant values of 20 and 15.6 is 3,253 hours and 1,425 hours, respectively. Calculation of the remaining life using the PLM method with a constant value based on API 530 is more conservative.

**Keywords:** Carbon steel, heat recovery steam generator, stress rupture test, Larson-Miller parameter.

## 1. PENDAHULUAN

*Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) atau juga dikenal dengan istilah *Combine Cycle* merupakan sistem pembangkit yang memanfaatkan panas gas buang (*flue gas*) dari turbin gas sehingga dihasilkan uap panas dengan temperatur dan tekanan tertentu (Burlian & Ghafara, 2013). Uap panas dari proses tersebut kemudian dikumpulkan untuk digunakan kembali untuk memutar turbin uap maupun untuk keperluan lain sehingga diperoleh efisiensi *thermal* yang besar.

Perusahaan minyak dan gas yang berlokasi di Sumatera total memiliki 3 unit HRSG yang berfungsi sebagai pembangkit listrik untuk kebutuhan operasi dan juga sebagai penghasil uap untuk mendukung sistem *Enhance oil recovery* (EOR). Pada HRSG unit 3 telah dilakukan penggantian total *heater tube* pada bulan Juli 2014, kemudian pada bulan Februari 2019 dilakukan *major overhaul* dan pengambilan sampel untuk dilakukan analisis *life assessment* untuk mengetahui sisa umur pakai unit HRSG tersebut. Tekanan dan temperatur desain pada HRSG tersebut adalah 1475 Psi (10,2 MPa) dan 725°F (385°C). Dalam mengontrol suhu operasi, *thermocouples* telah terpasang pada modul yang mendapatkan tambahan panas dari *burner*, sehingga modul tersebut akan mengalami suhu yang paling tinggi. Pengoperasian *burner* disesuaikan dengan *steam quality* yaitu sebesar 80%.

Material yang terpapar pada suhu tinggi akan meningkatkan laju regangan *creep* pada fase *steady* (*secondary creep*), sedangkan sisa umur pakai material akan berkurang (Callister & Rethwisch, 2012). Pada kondisi ini, material pipa dapat mengalami kegagalan (*rupture*) walaupun tegangan yang bekerja masih dalam batas elastis, hal ini sering terjadi pada *tube heater boiler*, HRSG atau komponen mesin lainnya yang dioperasikan pada suhu tinggi

Ketika *tube heater* telah beroperasi dalam kurun waktu tertentu, dapat dilakukan analisis sisa umur pakai untuk memberikan tambahan data sehingga pemilik fasilitas dapat menentukan keputusan yang tepat. Hal ini biasanya dilakukan pada unit *boiler* atau HRSG yang telah mendekati masa umur desain, apakah masih memungkinkan untuk

dilakukan *extend service life*, atau pada kondisi lain yaitu telah terjadi kerusakan/kegagalan pada material *tube heater* maka dilakukan analisis pada komponen lainnya apakah masih dalam kondisi yang aman untuk beroperasi.

Larson Miller parameter (PLM) adalah salah satu cara evaluasi sisa umur pakai pada material yang beroperasi pada suhu tinggi sehingga pengaruh *creep* akan menentukan material tersebut untuk terjadi *rupture*, dan banyak peneliti telah menggunakan metode ini. Evaluasi degradasi material dan analisis sisa umur pakai dilakukan pada *radiant tube petrochemical plant* (Ilman & Kusmono, 2014). Komposisi material *radiant tube* adalah 25 Cr-38Ni-Mo-Ti, yang dioperasikan pada suhu 820-835 °C dan telah beroperasi selama 76.500 jam. Dari analisis sisa umur pakai menggunakan metode PLM diperoleh sisa umur pakai *radiant tube* adalah 21.107 jam.

Analisis sisa umur pakai dilakukan pada pipa *lube oil complex* yang merupakan bagian dari fasilitas pengilangan minyak (Mulyana et al., 2015). Material pipa *lube oil complex* merupakan *medium carbon steel A-106B* tanpa perpaduan Cr dan Mo. Material tersebut dioperasikan pada range suhu 250-390°C dan telah dioperasikan selama 39 tahun. Karena telah terjadi pecah pada salah satu segmen pipa yang diperkirakan karena terjadi *overheating*, maka dilakukan evaluasi sisa umur pakai menggunakan metode PLM dengan beberapa skenario suhu operasi yaitu 400, 500 dan 700 °C. Dari hasil analisis diperoleh sisa umur pakai pipa dengan suhu operasi 400 °, 500 dan 700 ° adalah 100 tahun, 24 tahun dan 1,33 jam.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sisa umur pakai material pipa baja karbon SA 106 C yang digunakan sebagai *tube heater* pada *heat recovery steam generator* (HRSG) setelah dilakukan *major overhaul*, menggunakan metode Larson Miller parameter.

## 2. MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

Sampel material *tube heater* diambil dari HRSG unit 3 yang sedang dilakukan *major overhaul*, yaitu diambil pada pipa yang secara visual masih dalam kondisi baik. Jenis material *tube heater* adalah baja karbon SA 106 grade C yaitu pipa 4 inch, SCH 80. Diameter rata-rata pipa yang diteliti adalah 114,95 mm dan memiliki ketebalan 8,36 mm. Material pipa SA 106 C merupakan *medium carbon steel* dengan komposisi utama adalah Fe dan Mn (*ASME Boiler and Pressure Vessel*, 2021), komposisi kimia material pipa secara lengkap disajikan pada Tabel 1 yang didapatkan dari uji *spectrometer*. Alat uji *Spectrometer* yang digunakan adalah merk Thermo, model ARL 3460 buatan Swiss.

Tabel 1. Komposisi kimia pipa SA 106 C

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
Used pipe	0,288	0,829	0,015	0,006	0,219	0,039	0,021	0,007	0,020	0,001

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop untuk mengetahui fasa-fasa material yang terbentuk. Pada permukaan spesimen yang akan diamati, dilakukan pengamplasan dan pemolesan sehingga didapatkan permukaan yang halus, dan terakhir diberikan larutan nital sebelum diamati pada mikroskop. Permukaan spesimen yang diamati tersebut didapatkan dari potongan melintang dari *used pipe*. Mikroskop yang digunakan adalah merk Olympus, model BX53M buatan Jepang.

Analisis sisa umur pakai menggunakan *stress rupture test* sejumlah spesimen (ASTM E139-11, 2018) dengan dimensi spesimen mengikuti standard uji tarik (ASTM E8/E8M – 13a, 2021). Spesimen dipanaskan hingga 475 °C, setelah suhu setabil diberikan beban tertentu hingga terjadi *rupture*, kemudian waktu yang diperlukan hingga spesimen tersebut *rupture* dicatat. Pengujian dilakukan dengan kombinasi beberapa pembebanan kemudian hasilnya diplot pada kurva PLM *versus* tegangan. Nilai PLM dihitung menggunakan Persamaan 1. Mesin uji yang digunakan adalah *Satec System Inc*.

$$PLM = (\theta + 273)(C + \log t_r) \quad (1)$$

$\theta$  adalah suhu pengujian dalam Celcius,  $t_r$  adalah waktu *rupture* dalam jam, dan C adalah konstanta. Pada penelitian ini digunakan dua nilai konstanta yaitu 20 untuk *low alloy steel* berdasarkan ASM (*ASM Handbook*, 2000) dan 15,6 yang merupakan nilai minimum untuk *medium carbon steel* berdasarkan API (*API STANDARD 530*, 2015). Perhitungan sisa umur pakai menggunakan data suhu desain yaitu 385°C dan tekanan desain yaitu 10,2 MPa. Tegangan radial  $\sigma_h$  (*hoop stress*) akibat tekanan desain dihitung menggunakan Persamaan 2.

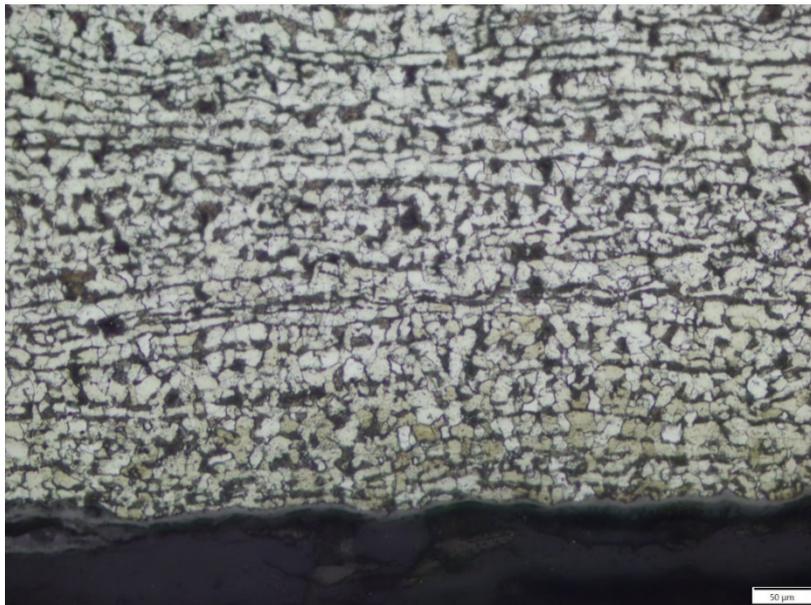
$$\sigma_h = \frac{P(D-t)}{2t} \quad (2)$$

P adalah tekanan desain yaitu 10,2 MPa, t adalah ketebalan pipa bekas minimum yaitu 8,36 mm dan D adalah diameter luar pipa bekas yaitu 114,95 mm. Dari perhitungan diperoleh *hoop stress* adalah 65,025 Mpa.

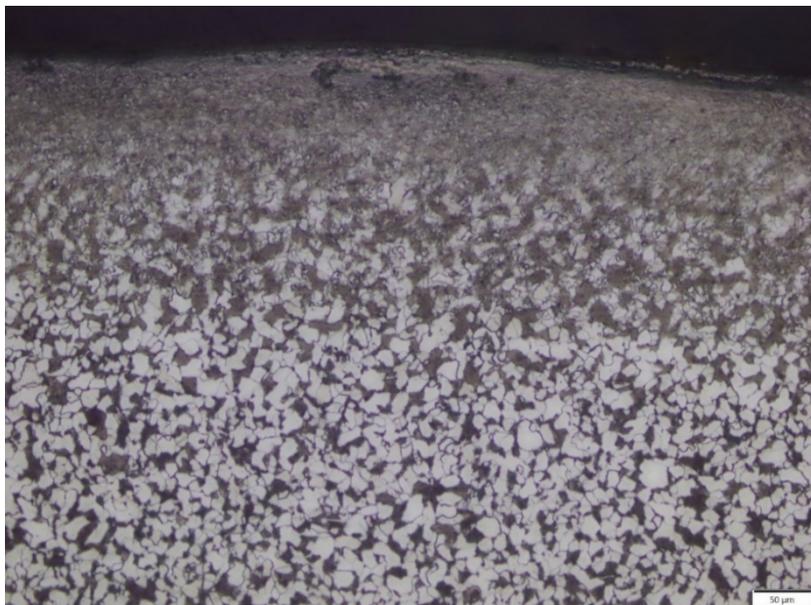
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Pengamatan struktur mikro

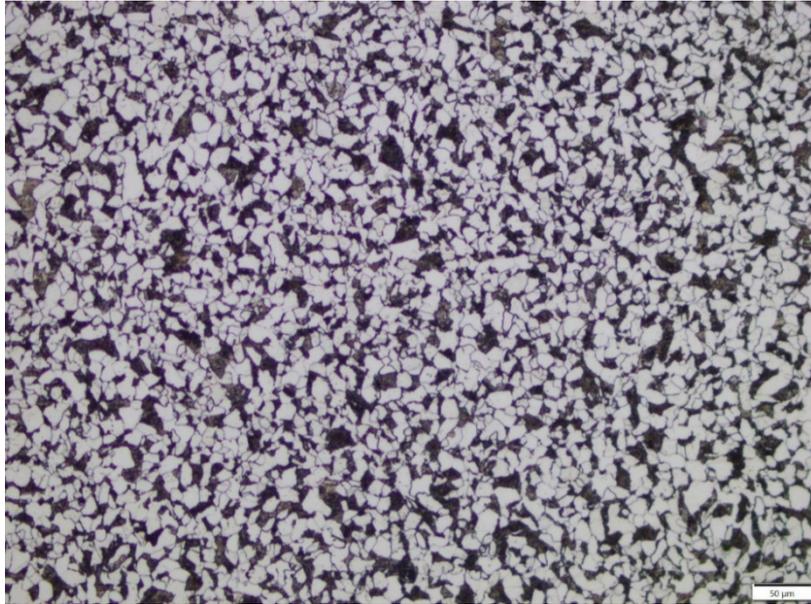
Pengamatan struktur mikro pada *used pipe* (Gambar 3), fasa yang terbentuk konsisten berupa fasa *pearlite* yang terlihat gelap dan fasa *ferrite* yang terlihat terang. Hasil tersebut sesuai dengan referensi yang diberikan oleh ASM bahwa struktur mikro *medium carbon steel* terdiri dari *pearlite* dan *ferrite* (ASM Handbook, 1985). Pada sisi dalam pipa (Gambar 1), struktur mikro terlihat berlapis teratur, hal ini karena efek dari penekanan saat proses pembuatan pipa *seamless*. Pada sisi terluar pipa (Gambar 2) yang merupakan *heating surface* terlihat adanya *oxide scale* setebal  $\pm 100 \mu\text{m}$ , *oxide scale* merupakan produk korosi logam pada suhu tinggi yaitu reaksi langsung antara gas dengan logam tanpa adanya *liquid electrolyte* (ASM Handbook, 2015). Lapisan setelah *oxide scale* adalah area yang mengalami *carburization* setebal  $\pm 150 \mu\text{m}$  yang merupakan akibat dari proses pemanasan oleh *flue gas* maupun *burner*. Logam yang terpapar suhu tinggi pada lingkungan yang mengandung hidrokarbon ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) seperti *carbon monoxide*, *methane*, *ethane*, *propane* dan gas hidrokarbon lainnya rentan terhadap *carburization*, yaitu pembentukan formasi internal *carbide*, yang menyebabkan logam dan paduannya menjadi getas dan penurunan mekanikal propertisnya (ASM Handbook, 2007). Turbin gas dan *burner* HRSG menggunakan *natural gas* sebagai bahan bakar, sehingga gas hidrokarbon ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) tersebut dapat berasal dari proses pembakaran yang tidak sempurna dari *natural gas*. Komposisi kimia terbesar dari *natural gas* adalah  $\text{CH}_4$  (*methane*), biasanya berkisar antara 80-99,5 mol% (Korpela et al., 2017).



Gambar 1. Struktur mikro inner pipe (pembesaran 200X)



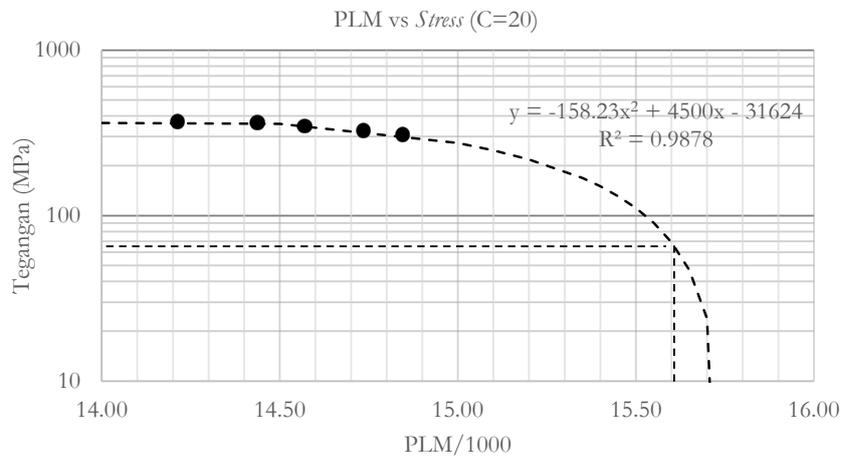
Gambar 2. Struktur mikro outer pipe (pembesaran 200X)



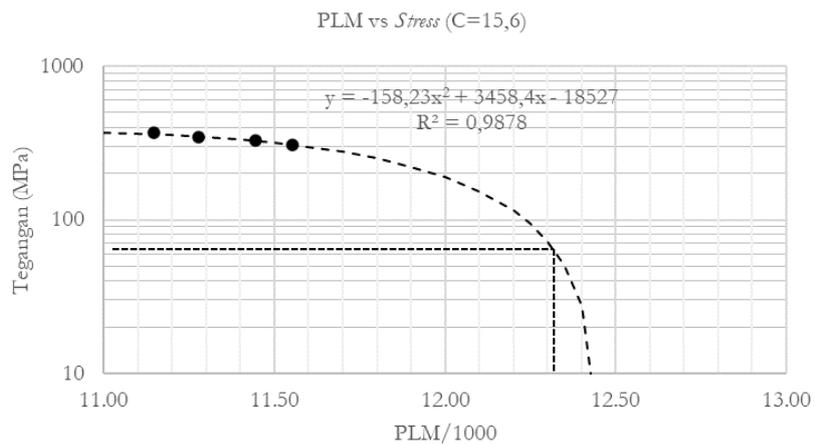
Gambar 3. Struktur mikro dinding pipa bagian tengah (pembesaran 200X)

### 3.2. Life Assessment

Hasil plotting antara tegangan dan PLM hasil pengujian *stress rupture test* dapat dilihat pada Gambar 4 untuk nilai C adalah 20 (ASM) dan Gambar 5 untuk nilai C adalah 15,6 (API). Nilai PLM diperoleh dari hasil ekstrapolasi pada kurva menggunakan *hoop stress* desain yaitu 65,025 MPa.



Gambar 4. Kurva PLM dengan C=20 (ASM)



Gambar 5. Kurva PLM dengan C=15,6 (API)

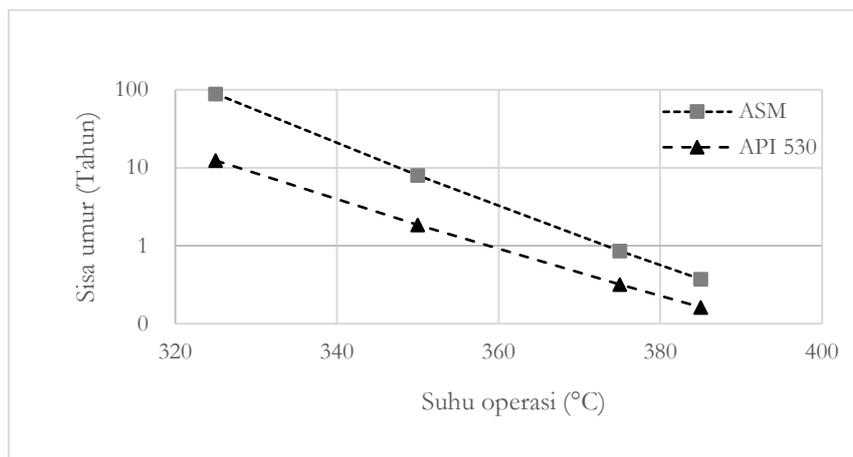
Hasil ekstrapolasi pada kurva, pada tegangan 65,025 MPa diperoleh nilai PLM 15,6 (ASM) dan 12,34 (API). Kemudian sisa umur pakai dihitung menggunakan Persamaan 3. berikut ini:

$$t_r = 10^{\left(\frac{1000 \cdot \text{PLM}}{0+273} - 19,63\right)} \quad (3)$$

$$t_r = 10^{\frac{1000 \cdot 15,6}{385+273} - 19,63} = 5.107 \text{ jam (ASM)}$$

$$t_r = 10^{\frac{1000 \cdot 12,34}{385+273} - 19,63} = 1.425 \text{ jam (API)}$$

Sisa umur pakai dari penyelesaian Persamaan 3. diperoleh 5.107 jam (ASM) dan 1.425 jam (API) dengan nilai PLM 15,6 (ASM). Perbandingan estimasi sisa umur pakai hasil ekstrapolasi Larson Miller dengan aktual umur adalah rata-rata 1,57 (ASM Handbook, 2000), maka hasil perhitungan dengan nilai konstanta (C) 20 dibagi dengan 1,57 menjadi 3.253 jam, dan masih cukup jauh berbeda dari hasil ekstrapolasi dengan nilai konstanta (C) API. Persamaan 1 yang digunakan dalam menghitung nilai PLM terdapat variabel konstanta (C) yang akan menjadi fungsi eksponensial pada persamaan 3, sehingga sedikit saja perubahan nilai C akan mengakibatkan perubahan nilai PLM dan estimasi sisa umur pakai hasil perhitungan dari Persamaan 3 yang signifikan.



Gambar 6. Ekstrapolasi sisa umur pakai pada kemungkinan suhu operasi lainnya

Grafik pada Gambar 6. menunjukkan bahwa ekstrapolasi dengan menggunakan konstanta (C) 15,6 berdasarkan API 530 lebih konservatif jika dibandingkan dengan konstanta (C) 20 berdasarkan ASM. Konstanta (C) dari beberapa jenis paduan (*alloys*) *tube heater* telah dioptimalkan menggunakan parametrik analisis (*Lot-Centered Analysis*) hasil pengujian dari berbagai sumber (API STANDARD 530, 2015), sehingga mempunyai range nilai konstanta (C) yang berbeda-beda sesuai jenis paduannya. Hal ini berbeda pada nilai konstanta (C) berdasarkan ASM yang menggunakan nilai 20 untuk semua jenis paduan.

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil analisis sisa umur pakai *tube heater* HRSG adalah:

- Sisa umur pakai pada suhu dan temperature desain menggunakan metode PLM dengan nilai konstanta 20 (ASM) dan 15,6 (API) adalah 3.253 jam dan 1.425 jam.
- Perhitungan sisa umur pakai menggunakan metode PLM dengan nilai konstanta berdasarkan API 530 lebih konservatif.
- Tube heater* dapat beroperasi lebih dari 1 tahun jika suhu operasi dapat dipertahankan di bawah 350°C.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- API STANDARD 530. (2015). *Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries*. API Publishing Services.
- ASM Handbook. (1985). *Metallography And Microstructures* (Vol. 9).
- ASM Handbook. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation: Vol. Volume 8*. ASM International.
- ASM Handbook. (2007). *High Temperature Corrosion And Materials Applications* (G. Y. Lai, Ed.). ASM International.  
<https://doi.org/10.1361/hcma2007p097>
- ASM Handbook. (2015). *Corrosion in the petrochemical industry* (V. Burt, Ed.; Second, Vol. 2015). ASM International.

- ASME Boiler and Pressure Vessel. (2021). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code, Part A Ferrous Material Specification* (2021st ed.). THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
- ASTM E8/E8M – 13a. (2021). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1: Vol. 03.01* (ASTM International, Ed.). [https://doi.org/10.1520/E0008\\_E0008M-21](https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-21)
- ASTM E139-11. (2018). *Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials1: Vol. 03.01* (ASTM International, Ed.). <https://doi.org/10.1520/E0139-11R18>
- Burlian, F., & Ghafara, A. (2013). *PERANCANGAN ULANG HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR DENGAN SISTEM DUAL PRESSURE MELALUI PEMANFAATAN GAS BUANG SEBUAH TURBIN GAS BERDAYA 160 MW* (Vol. 13, Issue 1).
- Callister, Jr. , W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of Materials Science and Engineering AN INTEGRATED APPROACH* (4th ed.).
- Ilman, M. N., & Kusmono. (2014). Analysis of material degradation and life assessment of 25Cr-38Ni-Mo-Ti wrought alloy steel (HPM) for cracking tubes in an ethylene plant. *Engineering Failure Analysis*, 42, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.03.020>
- Korpela, T., Kumpulainen, P., Majanne, Y., Häyrynen, A., & Lautala, P. (2017). Indirect NO<sub>x</sub> emission monitoring in natural gas fired boilers. *Control Engineering Practice*, 65, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.04.013>
- Mulyana, C., Saad, A. H., Nurhilal, O., & Farhan Yusuf, M. (2015). *Cukup Mulyana / Penentuan Umur Sisa Pipa (Tube) pada Pengilangan minyak Penentuan Umur Sisa Pipa (Tube) Pada Pengilangan Minyak. 55.*