ANALISIS PENGARUH TEKANAN OPERASIONAL DAN VARIASI BEBAN TERMAL PADA U-BEND TUBE FURNACE

Dimas Bintang Pratama[1*], Rakha Faiz Firgiawan[1], Regan Rahadian Pambudi[1]

Program Studi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, Jawa Tengah 58315

**E-mail*: dim.bpratama123@gmail.com

ABSTRAK

U-bend tube pada furnace industri minyak dan gas beroperasi di bawah tekanan internal dan fluktuasi temperatur dinding yang tinggi secara bersamaan. Kondisi ini mengakumulasi kerusakan fatigue pada area lengkungan dan berpotensi menyebabkan kegagalan sebelum jadwal perawatan terjadwal. Penelitian ini menganalisis distribusi tegangan Von Mises, deformasi, dan umur *fatigue u-bend tube* berbahan A53 Grade A menggunakan FreeCAD untuk analisis elemen hingga dan Fatlab untuk kalkulasi kurva S-N dan Probability of Failure. Dua kondisi operasional disimulasikan, dimana Kondisi 1 dengan tekanan ±2 MPa dan tube metal temperature 400°C, serta Kondisi 2 dengan tekanan ±1,75 MPa dan tube metal temperature 380°C. Beban fluktuatif sebesar 100 kPa diaplikasikan pada kedua kondisi dengan siklus operasional 3 kali per tahun. Kondisi 1 menghasilkan tegangan Von Mises tertinggi 14,13 MPa, displacement maksimum 7,83 µm, dan *endurable life cycles* 12 siklus, setara umur operasional 4 tahun. Kondisi 2 menghasilkan tegangan 12,27 MPa, *displacement* 6,8 µm, dan *endurable life cycles* 18 siklus, setara 6 tahun. Kedua kondisi menghasilkan tegangan di bawah maximum allowable stress material 99,1 MPa namun *utilization ratio* di atas 1 mengindikasikan akumulasi kerusakan *fatigue* yang signifikan pada kedua skenario, yang berpotensi memicu inisiasi retak dini dan mempercepat risiko kegagalan fatal pada pipa sebelum umur desain perawatannya tercapai. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi FreeCAD dan Fatlab sebagai perangkat lunak *open-source* menghasilkan prediksi umur *fatigue* yang terukur dan dapat digunakan sebagai acuan jadwal retubing.

Kata kunci: *U-bend tube, furnace, fatigue life, FEA, FreeCAD, Fatlab*

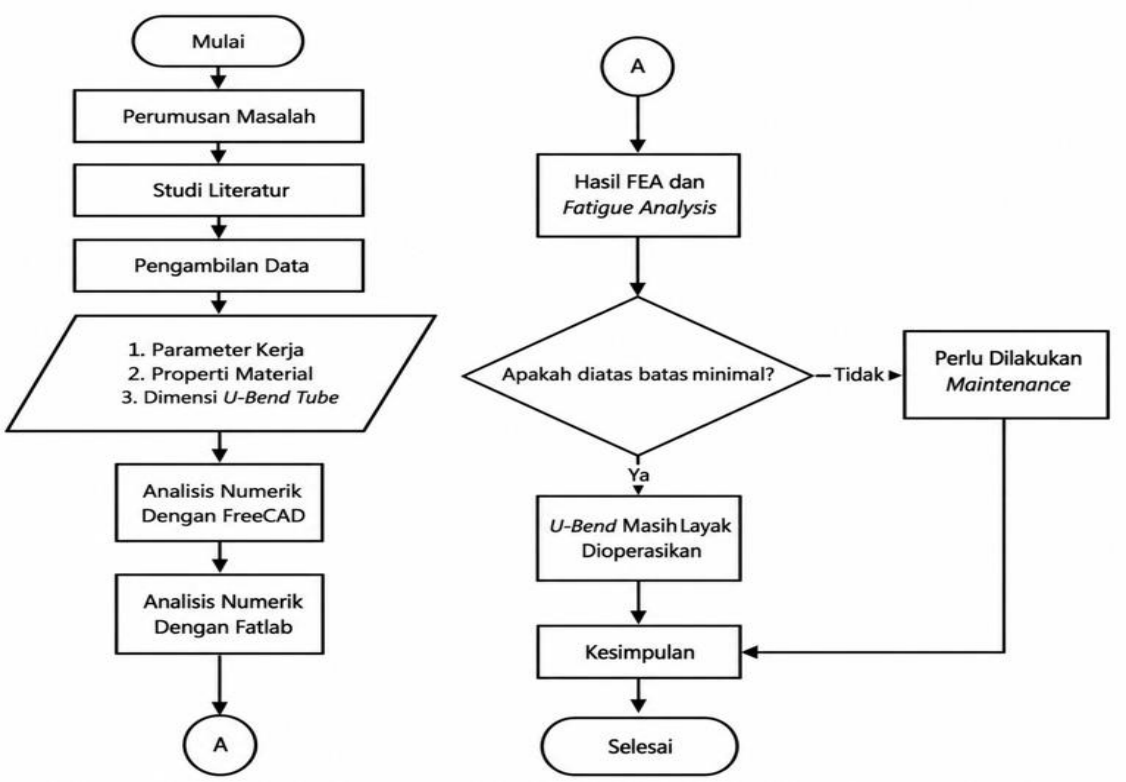
1. PENDAHULUAN

Pada industri minyak dan gas maupun industri pembangkit, berbagai peralatan mekanik stationary dan *rotary equipment* memegang peranan krusial dalam keberlanjutan proses produksi. Salah satu peralatan stationary yang memiliki fungsi vital adalah *furnace* (tungku pembakaran). Furnace berfungsi mentransfer energi panas hasil pembakaran bahan bakar secara langsung ke fluida proses yang mengalir di dalam *tubing* hingga mencapai temperatur operasi yang diinginkan [1]. Di dalam *furnace*, salah satu komponen yang paling rentan mengalami kegagalan struktural adalah U-bend tube (pipa yang melengkung berbentuk U).

Untuk mempertahankan keandalan (*reliability*) dan masa pakai (*lifetime*) sistem *furnace*, keutuhan struktural *U-bend tube* harus terus dipantau. *U-bend tube* beroperasi pada kondisi temperatur dan tekanan yang sangat ekstrem, melibatkan kombinasi tekanan internal fluida yang tinggi serta fluktuasi temperatur dinding pipa (tube metal temperature) akibat paparan langsung gas buang dan radiasi *burner* [2]. Kondisi ini menginduksi timbulnya tegangan mekanis dan tegangan termal (*thermal stress*) yang signifikan, terutama pada area konsentrasi tegangan di sepanjang geometri lengkungan pipa. Kegagalan dini pada *U-bend tube* juga dapat dipicu oleh kombinasi pembebanan siklis serta tingginya temperatur operasional yang mempercepat pembentukan titik konsentrasi tegangan (*stress concentration sites*) pada area lengkungan [9].

Jika tidak teridentifikasi dan dikelola dengan baik, akumulasi tegangan statis dan dinamis secara berulang akan menyebabkan fenomena kelelahan material (*fatigue cycle degradation*), pemicu retak mikro, kebocoran fluida berbahaya, hingga kegagalan fatal (*catastrophic failure*) yang berisiko tinggi memicu kebakaran serta shutdown mendadak [3]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi, dan prediksi umur kelelahan (*fatigue life*) *U-bend tube furnace* berbahan ASTM A53 Grade A menggunakan integrasi *software open-source* FreeCAD (FEA solver) dan Fatlab (*fatigue assessment software*) [4]. simulasi elemen hingga pada komponen tube berbentuk lengkungan mampu mengidentifikasi moda kegagalan kritis secara akurat, termasuk distribusi tegangan pada area transisi antara segmen lurus dan segmen melengkung, dengan hasil yang konsisten terhadap validasi eksperimental [5]. titik konsentrasi tegangan tertinggi dari FEA selalu menjadi lokasi inisiasi retak fatigue pertama [6]. Beberapa penelitian terdahulu telah melakukan investigasi terkait integritas struktural komponen penukar panas. [10]. menyelidiki mekanisme kegagalan pada *u-bend tube* akibat operasi bersuhu tinggi secara kontinu, namun studi tersebut berfokus pada kerusakan material fisik dan belum melakukan simulasi umur kelelahannya secara numerik. Di sisi lain, [4] telah membuktikan dan memvalidasi penggunaan *software open-source* Fatlab untuk analisis *fatigue* berbasis 3D FEA, namun belum diaplikasikan pada dinamika operasional industri perminyakan. Keterbaruan (*novelty*) dalam penelitian ini adalah integrasi simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan FreeCAD dan analisis siklus kelelahan kumulatif dengan Fatlab secara khusus pada material ASTM A53 Grade A. Penelitian ini secara spesifik mengevaluasi sensitivitas perubahan kecil antara dua kondisi parameter operasional terhadap rasio kerusakan dan sisa umur layan komponen.

2. METODE



Gambar 1. Flowchart Kerja Simulasi

Dalam proses pelaksanaannya, serangkaian tahapan yang mencakup identifikasi permasalahan, studi literatur, pemodelan dan simulasi, hingga analisis dan pelaporan hasil ditulis dalam bentuk *flowchart* yang ditunjukan pada Gambar 1 sebagai berikut

Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) dan analisis kelelahan berbasis kurva S-N. Objek penelitian difokuskan pada komponen *U-bend tube furnace* yang beroperasi pada fasilitas pengolahan minyak dan gas. Spesifikasi geometri tube yang dimodelkan mengacu pada standar pipa bejana tekan berukuran nominal 3 inci SCH 40. Parameter geometri utama ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Geometri dan Properti Material Tube

Parameter Geometri & Material	Simbol	Nilai / Satuan
Diameter Luar (Outer Diameter)	OD	88,9 mm
Diameter Dalam (Inner Diameter)	ID	73,66 mm
Tebal Dinding (Wall Thickness)	t	7,62 mm
Radius Lengkungan (Bend Radius)	R	495,3 mm
Material Tube	-	ASTM A53 Grade A
Modulus Elastisitas	E	210.000 MPa
Poisson's Ratio	ν	0,30
Massa Jenis (Density)	ρ	7.900 kg/m³
Konduktivitas Termal	k	43 W/m·K
Maximum Allowable Stress	Sa	99,1 MPa

Simulasi dikondisikan pada dua operasional yang berbeda untuk mengevaluasi sensitivitas perubahan tekanan dan temperatur terhadap umur kelelahan material, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Operasional

Parameter Operasional	Kondisi 1	Kondisi 2
Tekanan Internal (P)	2,00 MPa	1,75 MPa
Fluktuasi Tekanan (ΔP)	100 kPa	100 kPa
Temperatur Fluida (T_fluid)	253 °C	240 °C
Tube Metal Temp. (TMT)	400 °C	380 °C
Frekuensi Siklus Operasi	3 / tahun	3 / tahun

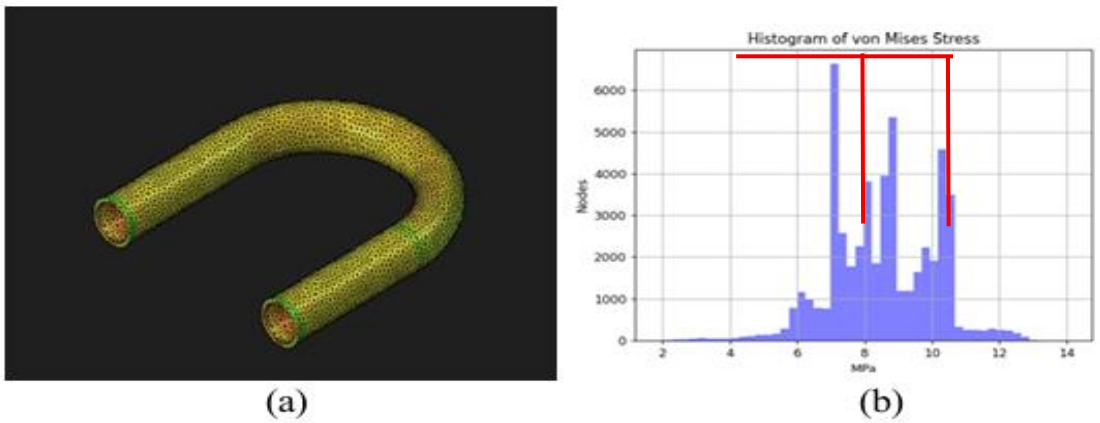
Pemilihan Kondisi 1 dan Kondisi 2 didasarkan pada fluktuasi aktual harian yang kerap terjadi di lapangan, khususnya pada masa transisi seperti *start-up*, *shut-down*, maupun saat terjadi perubahan laju bahan bakar *burner*. Meskipun perbedaan tekanan (sebesar 0,25 MPa) dan temperatur (sebesar 20°C) antara kedua kondisi ini tampak tidak signifikan secara makroskopis, perubahan operasional sekecil apa pun akan memicu variasi amplitudo regangan termal dan mekanis. Dampak perbedaan kondisi operasi ini dianalisis secara komparatif dengan melihat nilai luaran *endurable life cycles* dan *utilization ratio* pada kurva S-N. Validasi dari hasil simulasi ini dilakukan secara teoritik dengan memverifikasi tegangan Von Mises maksimum yang dihasilkan; nilai ini divalidasi dengan memastikannya tidak melampaui *maximum allowable stress* untuk material ASTM A53 Grade A sebesar 99,1 MPa. Selain itu, lokasi konsentrasi tegangan disesuaikan kelogisannya terhadap studi literatur di mana titik kritis selalu muncul pada intrados bagian lengkungan.Pemodelan 3D dan analisis struktur awal dieksekusi menggunakan modul FEM pada FreeCAD. *Mesh generator* digunakan untuk menghasilkan elemen *solid tetrahedra* berorde tinggi. Hasil distribusi tegangan *Von Mises* dan deformasi kemudian diekspor ke Fatlab untuk perhitungan siklus kelelahan kumulatif. Proses

pembagian elemen (*meshing*) menggunakan modul FEM berbasis Netgen pada FreeCAD ini memastikan diskretisasi geometri yang presisi sehingga analisis nodal tegangan pada area kritis dapat dievaluasi secara akurat [9].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Tegangan Von Mises

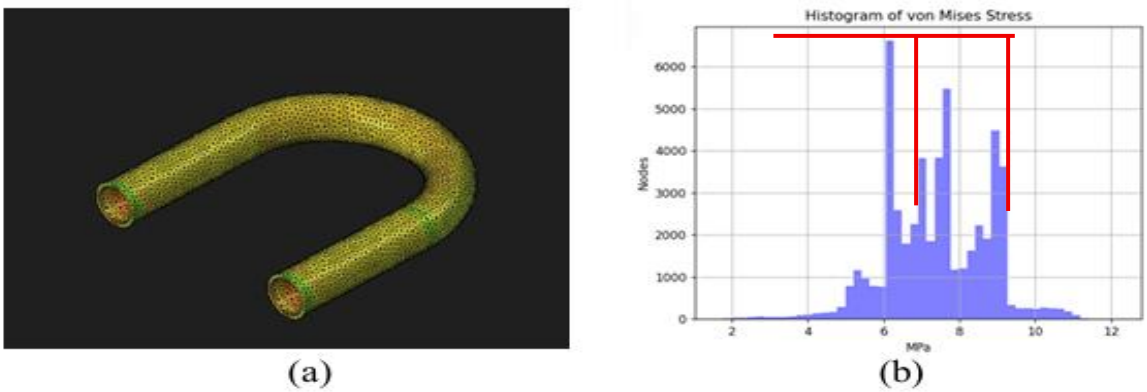
Pada Kondisi 1 (Gambar 2a), hasil analisis tegangan (*stress*) tertinggi terletak pada bagian dalam lengkungan pipa (*intrados*) yang ditandai dengan gradasi warna kuning hingga merah gelap pada representasi *heatmap*, yakni sebesar 14,13 MPa dan distribusi utamanya menyebar di sekitar 7 hingga 11 MPa. Gambar 2, gambar terlihat stress yang diterima *U-Bend Tube* ketika diberi beban pada kondisi 1. Sehingga diketahui stress yang diterima *U-Bend Tube* sebelum mengalami deformasi.



Gambar 2. Von Mises Stress Kondisi 1; Heatmap (a); Histrogram (b)

Pada Kondisi 2, Pada Gambar 3. menunjukan hasil analisis tegangan (*stress*) menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar 12,27 MPa, Sementara itu, distribusi tegangan pada sebagian besar area struktur berada pada rentang 6 hingga 9 MPa, terdapat konsentrasi tegangan pada titik tertentu yang menghasilkan nilai maksimum 12,27 MPa.

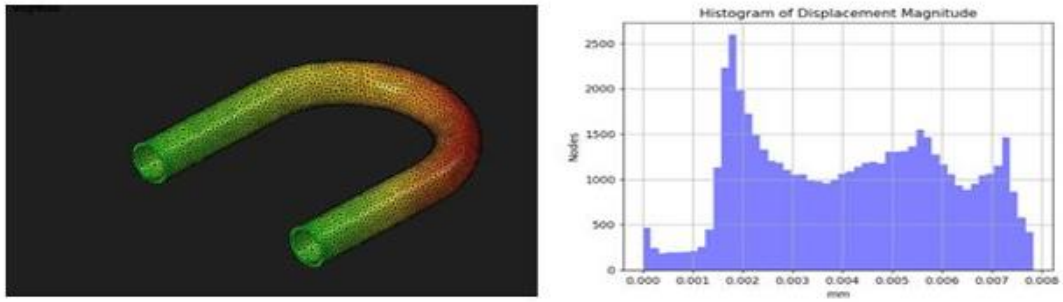
Distribusi tegangan cukup merata, namun area dengan tegangan tertinggi berpotensi menjadi lokasi awal deformasi atau kegagalan apabila pembebanan meningkat melebihi batas kekuatan material. Pada Gambar 3. terlihat nilai stress yang diterima U-Bend Tube ketika diberikan beban pada Kondisi 2. Dari hasil tersebut dapat diketahui besarnya stress yang diterima U-Bend Tube sebelum mengalami deformasi.



Gambar 3. Von Mises Stress Kondisi 2; Heatmap (a); Histrogram (b)

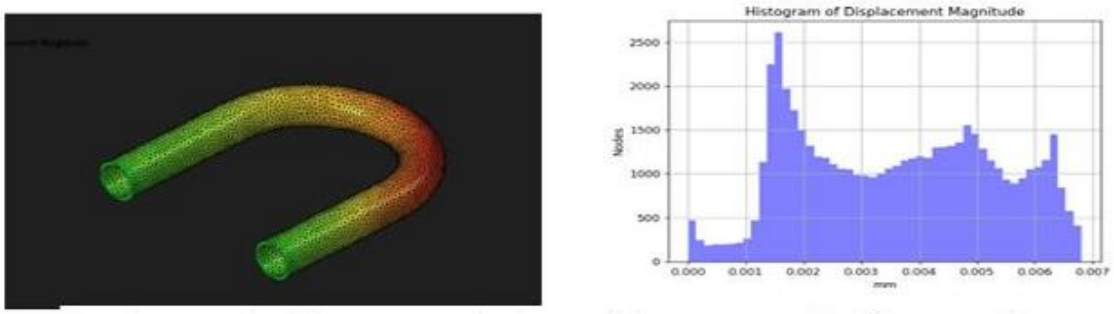
B. Analisis Deformasi (Displacement)

Pada Kondisi 1 Gambar 4. simulasi displacement menunjukkan nilai maksimum sebesar 7,83 µm (area merah) akibat kombinasi beban tekanan internal dan temperatur. Sebagian besar struktur *U-Bend Tube* mengalami deformasi kontinu pada rentang 1,05–7,5 µm. Nilai ini tergolong sangat kecil apabila dibandingkan dengan ketebalan dinding pipa (*wall thickness*) yang mencapai 7,62 mm, serta jauh dari batas deformasi plastis material ASTM A53 Grade A. Hal ini mengindikasikan tingkat kekakuan struktur yang baik, mengindikasikan tingkat kekakuan struktur yang baik namun, area perpindahan tertinggi tetap perlu diwaspadai terhadap potensi peningkatan deformasi dalam jangka panjang. Visualisasi *heatmap* (a) dan *histogram* (b) secara keseluruhan memperlihatkan pola penyebaran perpindahan tersebut. Berdasarkan visualisasi Gambar 4 dan Gambar 5, fenomena mekanis utama yang menyebabkan deformasi pada *u-bend tube* adalah kombinasi tekanan internal dan tegangan termal. Ekspansi pipa ke arah memanjang (*longitudinal*) tertahan oleh kedua ujung pipa (*fixed supports*), sehingga akumulasi perpanjangan tersebut memaksa geometri lengkungan untuk meregang keluar (*bending deformation*), menjadikan titik lengkungan bagian atas menyerap perpindahan (*displacement*) tertinggi.



(a) (b)

Gambar 4. Displacement Magnitude Kondisi 1; Heatmap (a); Histrogram (b)



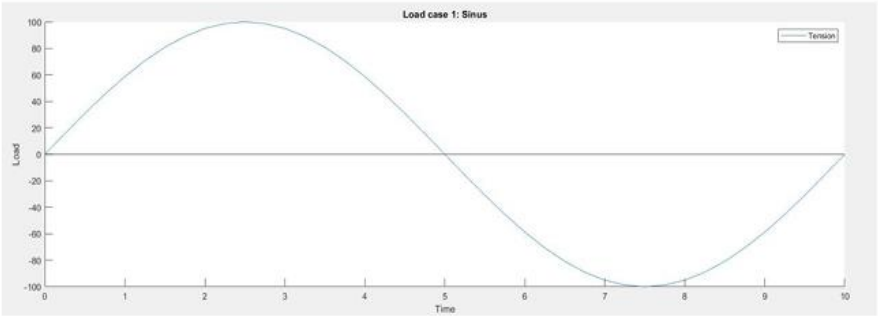
(a) (b)

Gambar 5 Displacement Magnitude Kondisi 2; Heatmap (a); Histrogram (b)

Pada Kondisi 2 Gambar 5. simulasi *displacement* menunjukkan nilai maksimum sebesar 6,8 µm (area merah) pada titik dengan pembebanan terbesar atau kekakuan terendah. Sementara itu, sebagian besar struktur mengalami deformasi bertahap pada rentang 1,04–6,76 µm. Nilai yang relatif kecil ini mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan yang baik dan deformasi masih berada dalam batas desain yang diizinkan, yang divisualisasikan melalui heatmap (a) dan histogram (b).

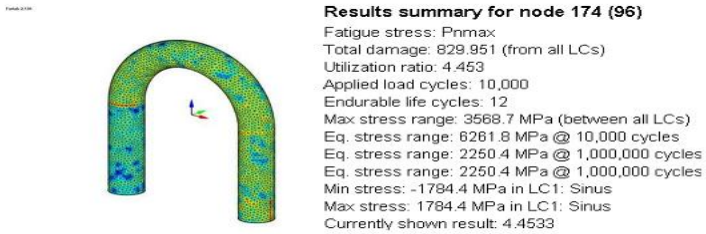
C. Analisis Fatigue Life dan Endurable Cycles

Dalam kondisi operasional *furnace* di industri migas dan petrokimia, *U-Bend Tube* tidak terhindar dari fluktuasi beban akibat dinamika produksi, perubahan bahan bakar, serta siklus start-up dan shut-down. Besar fluktuasi tekanan internal yang diaplikasikan dalam penelitian ini adalah 100 kPa (sekitar 1 bar), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 . Fluktuasi Beban Pada U-Bend Tube

Pada kondisi 1, analisis *fatigue node* 174 menghasilkan *endurable life cycles* sebesar 12 siklus dengan *utilization ratio* 4,453. Total damage tercatat 829,951 dan *equivalent stress range* mencapai 6261,8 MPa pada 10.000 siklus, turun ke 2250,4 MPa pada 1.000.000 siklus. Dengan pembebanan 3 siklus per tahun, *U-Bend Tube* mampu bertahan selama 4 tahun. Gambar 7. merupakan Hasil *Fatigue* pada kondisi pertama menggunakan *soft ware fatlab.*



(a) (b)

Gambar 7 . Fatigue Kondisi 1; Heatmap (a); Summary (b)



(a) (b)

Gambar 8. Fatigue Kondisi 1; Heatmap (a); Summary (b)

Pada Kondisi 2 Gambar 8 menunjukan analisis *fatigue* menggunakan Fatlab menunjukkan peningkatan ketahanan beban siklus, dengan *endurable life cycles* sebesar 18 siklus dan *utilization ratio* 8,238. Total kerusakan kumulatif (*total damage*) tercatat sebesar 559,135, dengan tren penurunan *equivalent stress range* dari 3.568,7 MPa (10.000 siklus) hingga 356,9 MPa (10.000.000 siklus) sesuai karakteristik kurva S-N. Dengan asumsi 3 siklus per tahun, umur layan (*service life*) *U-Bend Tube* diperkirakan mencapai 6 tahun, meski area kritis

berpotensi mengalami kegagalan kelelahan tetap memerlukan pengawasan dalam pemeliharaan.

D. Perbandingan Hasil Pada Kondisi Dengan Allowable

Tegangan maksimum kondisi 1 sebesar 14,13 MPa dan kondisi 2 sebesar 12,27 MPa, keduanya berada jauh di bawah allowable stress 99,1 MPa sehingga secara *statis u-bend tube* dinyatakan aman dengan rasio tegangan terhadap allowable masing-masing 0,143 dan 0,124. Tabel 3 merupakan perbandingan hasil analisis antara 2 kondisi operasional terhadap nilai *allowable stress* material A53 Grade A.

Tabel 3. Hasil Perbandingan Pada Kondisi Berbeda

Parameter	Kondisi 1	Kondisi 2	Allowable	Status
Tekanan internal (MPa)	±2,00	±1,75	N. A	N. A
Tube metal temperature (°C)	400	380	N. A	N. A
Tegangan maks. (MPa)	14,13	12,27	99,1	Aman
Rasio tegangan / allowable	0,143	0,124	1	Aman
Endurable life cycles	12 siklus	18 siklus	N. A	N. A
Estimasi umur(3 siklus/tahun)	4 tahun	6 tahun	N. A	N. A

Meskipun Kondisi 1 dan Kondisi 2 sama-sama memenuhi kriteria keamanan statis—dengan tegangan maksimum (14,13 MPa dan 12,27 MPa) jauh di bawah batas izin material A53 Grade A sebesar 99,1 MPa—perbedaan parameter operasional berdampak signifikan terhadap *fatigue life* .

Penurunan tekanan internal sebesar 0,25 MPa (dari 2,00 MPa menjadi 1,75 MPa) dan penurunan temperatur *Tube Metal Temperature* (TMT) sebesar 20°C (dari 400°C menjadi 380°C) pada Kondisi 2 meningkatkan *endurable life cycles* dari 12 menjadi 18 siklus. Dengan asumsi 3 siklus per tahun, estimasi umur pakai *U-bend tube* meningkat dari 4 tahun menjadi 6 tahun (bertambah 2 tahun).

Hal ini membuktikan bahwa *fatigue life* sangat sensitif terhadap amplitudo tegangan siklis dan temperatur operasional yang mempercepat propagasi retak. Oleh karena itu, evaluasi tegangan statis saja tidak cukup untuk menjamin integritas jangka panjang komponen. Analisis *fatigue* berbasis siklus operasional dan kurva S-N mutlak diperlukan dalam penyusunan jadwal inspeksi, perawatan preventif, serta keputusan *retubing* guna mencegah kegagalan mendadak di lapangan. Temuan ini sejalan dengan studi analisis kegagalan komponen U-bend, di mana pengoperasian fluida bertekanan dan bertemperatur tinggi secara kontinu tanpa evaluasi umur kelelahan yang tepat dapat mengakibatkan kegagalan prematur dan kebocoran mendadak pada sistem pertukaran panas [10].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis elemen hingga dan simulasi umur kelelahan (*fatigue life*) pada *u-bend tube furnace* berbahan ASTM A53 Grade A, tegangan Von Mises maksimum pada Kondisi 1 (14,13 MPa) maupun Kondisi 2 (12,27 MPa) terbukti berada jauh di bawah *maximum allowable stress* material sebesar 99,1 MPa. Hal ini memastikan bahwa secara murni statis,

struktur dinyatakan sangat aman dari kegagalan. Deformasi struktural yang terjadi juga tergolong kecil dan selalu berpusat pada area lengkungan pipa, dengan nilai perpindahan maksimal mencapai 7,83 μm pada Kondisi 1 dan 6,80 μm pada Kondisi 2. Meskipun sangat aman dari parameter statis, analisis akumulasi pembebanan siklis (*fatigue*) menunjukkan bahwa tegangan berulang memiliki dampak yang krusial. Estimasi umur pakai pipa pada pembebanan Kondisi 1 hanya mampu bertahan selama 12 siklus (setara umur operasional 4 tahun). Namun, dengan sedikit penurunan parameter operasi, yakni reduksi tekanan sebesar 0,25 MPa dan reduksi *Tube Metal Temperature* (TMT) sebesar $20^{\circ}C$ pada Kondisi 2, akumulasi kerusakan berhasil diperlambat sehingga masa pakai (*endurable life cycles*) pipa meningkat 50% menjadi 18 siklus atau setara dengan 6 tahun masa operasional.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] W. Su, Q. Cao, G. Cui, dan Z. Chen, "Investigations on Fatigue Life of Tube Connections Based on International Codes of Pressure Vessel," Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 142, no. 4, pp. 041301, 2020.

[2] K. Ma, et al., "Hydrogen assisted fatigue life of Cr-Mo steel pressure vessel with coplanar cracks based on fatigue crack growth analysis," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 38, pp. 19820-19832, 2020.

[3] Y. Han dan Y. Xu, "Finite-element-based analysis of the flow field and temperature field in a polysilicon reduction furnace," Applied Thermal Engineering, vol. 115, pp. 1021-1030, 2017.

[4] M. M. Pedersen, "Fatlab: Free open-source fatigue analysis software for 3D finite element models," Computers & Structures, vol. 155, pp. 42-53, 2015.

[5] W. M. Shewakh dan I. M. Hassab-Allah, "Finite Element Simulation and Experimental Verification of Circular Tube Nosing through Conical 43 Dies,"Appl. Sci., vol. 14, p. 2337, 2024

[6] X. P. Niu, S. P. Zhu, J. C. He, Y. Ai, K. K. Shi, dan L. P. Zhang, "Fatigue reliability design and assessment of reactor pressure vessel structures: Concepts and validation," Int. J. Fatigue, vol. 153, p. 106524, 2021.

[7] R. R. Pambudi and R. Alexander, “Comparative finite element analysis of IIW linear stress extrapolation and Haibach methods for structural hot-spot stress prediction in welded plate joints,” Journal of Welding Technology, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.30811/jowt.v8i1.9504.

[8] R. R. Pambudi and A. Ayende, “Numerical framework for multi-pass SMAW pre-WPS development on SA-36 low carbon steel,” Journal of Welding Technology, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.30811/jowt.v8i1.9252.

[9] S. Handoko, R. R. Pambudi, H. S, and M. A. F. T, "Pump Head Induced Shaft Safety Analysis On A Centrifugal Pump Using FreeCAD," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1504, p. 012011, 2025.

[10] M. Achyarsyah, K. Hanaldi, W. Purwadi, G. N. Hermana, A. Siswanto, C. Ruskandi, and M. R. G. Nadib, "Investigation of Failure Mechanisms in U-Bend Tubes of Shell-and-Tube Heat Exchangers," *Metalurgi*, vol. 39, no. 3, pp. 151-158, 2024.