



ANALISIS KEGAGALAN PIPA ELBOW *SUPERHEATER* 90° TERHADAP PERLAKUAN BENDING MENGGUNAKAN *HYDRAULIC PIPE BENDER*

Rachmat Dwi Sampurno¹, Dodi Tafrant^{1*}, Fenoria Putri¹, Hendradinata¹, Dwi Arnoldi¹,
Surya Ramadhan¹

¹ Jurusan Teknik Mesin Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya

Korespondensi:

*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya
dodi.tafrant@polsri.ac.id

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit yang paling banyak digunakan. Uap yang dihasilkan dialirkan melalui pipa *superheater*, yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi. Salah satu titik rawan kegagalan adalah pipa elbow *superheater*, khususnya yang dibentuk menggunakan metode bending manual. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan struktur mikro dan sifat mekanik pipa elbow *superheater* akibat perlakuan bending. Tiga sampel diuji: pipa pabrikan, pipa hasil bending manual, dan pipa bocor. Pengujian dilakukan dengan metode metalografi sesuai standar ASTM. Hasil menunjukkan bahwa pipa pabrikan memiliki kandungan perlit 53,50% dan ferit 27,50%, yang mencerminkan kekerasan dan ketahanan yang baik. Pipa hasil bending manual menunjukkan penurunan perlit menjadi 43,00% dan peningkatan ferit menjadi 36,00%, mengindikasikan penurunan kekuatan material. Pipa bocor mengandung perlit 37,50%, ferit 43,00%, dan menunjukkan indikasi pembentukan fasa martensit akibat perlakuan panas, yang meningkatkan kekerasan namun menurunkan kemampuan menahan tekanan. Hasil ini menunjukkan bahwa metode pembentukan berpengaruh secara signifikan terhadap performa pipa *superheater*.

Kata kunci: analisis kegagalan, uji metalografi, elbow *superheater*, bending

Abstract

Steam power plants are among the most widely used types of power generation systems. The generated steam is conveyed through *superheater* pipes, which operate under high pressure and temperature. One of the most vulnerable components is the *superheater* elbow pipe, especially those formed using manual bending methods. This study aims to analyze the changes in microstructure and mechanical properties of *superheater* elbow pipes due to bending treatment. Three samples were examined: a factory-fabricated pipe, a manually bent pipe, and a leaking pipe. Metallographic testing was conducted in accordance with ASTM standards. The results showed that the factory pipe contained 53.50% pearlite and 27.50% ferrite, indicating good hardness and durability. The manually bent pipe showed a decrease in pearlite to 43.00% and an increase in ferrite to 36.00%, suggesting a reduction in material strength. The leaking pipe contained 37.50% pearlite and 43.00% ferrite, along with indications of martensite phase formation due to heat treatment, which increased hardness but reduced pressure resistance. These findings highlight the significant impact of forming methods on the performance of *superheater* pipes.

Keywords: failure analysis, metallographic test, *superheater* elbow, bending

1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu sistem pembangkit yang paling banyak digunakan dalam industri energi karena efisiensinya dalam mengonversi energi termal menjadi energi mekanik dan listrik. Salah satu komponen vital dalam sistem ini adalah boiler, yang berfungsi menghasilkan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap tersebut kemudian dialirkan melalui jaringan pipa *superheater* menuju turbin. Pipa *superheater* bekerja pada zona temperatur ekstrem, menjadikannya rentan terhadap kegagalan material.

Unit boiler yang digunakan di PLTU PT. BEST berjenis boiler CFB. Boiler CFB memiliki cara kerja dengan menginjeksikan udara ke pembakaran primer menggunakan *bed material* yang berupa pasir. Udara yang dimasukkan pada kecepatan tertentu akan menyebabkan *bed material* terangkat dan terjadinya fluidisasi yang memudahkan dalam proses pencampuran antara bahan bakar dan udara sehingga mempercepat proses pembakaran (Wijayanto, 2018).



Gambar 1. Boiler Tipe Circulation Fluidized Bed
(sumber: PT. Bukit Energi Servis Terpadu)

Jenis pipa super heater yang digunakan di PLTU PT. BEST 3x10 MW unit Tanjung Enim menggunakan pipa super heater berjenis pipa baja paduan rendah. Pipa baja paduan rendah merupakan komponen pipa baja dengan kandungan unsur karbon yang kurang dari 0,25% C. Pipa baja jenis ini tidak dapat dikeraskan dikarenakan kandungan karbonnya tidak mencukupi untuk terbentuknya martensit (Nofri & Fardiansyah, 2018). Uap yang dihasilkan boiler akan dialirkan menggunakan pipa *superheater*. Pipa *superheater* terletak pada zona terpanas pada boiler, yang dimana rangkaian pipa *superheater* itu terdapat 3 komponen yaitu pipa *superheater*, elbow *superheater* dan jacket pelindung pipa *superheater*.

Salah satu bagian yang paling rawan mengalami kegagalan adalah pipa elbow *superheater*, yaitu sambungan berbentuk belokan yang digunakan untuk mengatur arah aliran uap. Kegagalan komponen ini kerap terjadi akibat perubahan mikrostruktur yang dipicu oleh perlakuan mekanis maupun termal, khususnya pada proses *manual bending*. Berdasarkan studi kasus di PT. BEST, pipa elbow *superheater* yang dibentuk menggunakan *Hydraulic Pipe Bender* secara manual sering mengalami kebocoran dalam waktu yang relatif singkat setelah pengoperasian awal.



Gambar 2. Sampel pipa *elbow superheater* 90°

Proses bending manual dapat menyebabkan deformasi plastis tidak merata, terutama pada bagian ekstrados pipa yang mengalami tegangan tarik berlebih. Hal ini memicu perubahan fase mikrostruktur seperti perlit, ferit, bahkan martensit, yang berdampak pada penurunan kekerasan dan ketahanan pipa terhadap tekanan dan suhu tinggi. Studi oleh Vermeij dan Hoefnagels (2021) menunjukkan bahwa interaksi antara deformasi pada ferit dan retakan di lamela semenit perlit merupakan mekanisme kunci dalam inisiasi kegagalan pada baja ferit-perlit, terutama ketika terjadi konsentrasi regangan lokal.

Lebih lanjut, Lian et al. (2023) dalam analisis terhadap sambungan tee pipa uap tekanan tinggi menemukan bahwa tetesan air kondensasi dapat menimbulkan tekanan termal siklik yang menyebabkan *ratcheting effect* dan *spheroidisasi* perlit. Hal ini mengarah pada peningkatan kekerasan namun penurunan ketangguhan material, khususnya pada struktur sambungan pipa.

Kasus serupa juga ditemukan dalam studi Yudanto et al. (2021), di mana kegagalan pada pipa elbow penghubung antara high-pressure heater dan deaerator disebabkan oleh erosi impingement dari aliran dua fase uap dan air. Fenomena ini mempercepat penipisan dinding dan memperlemah kekuatan pipa secara signifikan dalam waktu operasi kurang dari lima tahun.

Selain kerusakan akibat faktor mekanis dan aliran fluida, perubahan mikrostruktur akibat temperatur tinggi juga berkontribusi besar dalam kerusakan pipa *superheater*. Penelitian oleh Hosseini dan Yareiee (2019) menunjukkan bahwa kondisi overheat jangka pendek dapat menyebabkan *rupture* longitudinal pada pipa karena perubahan fasa mikro dan degradasi kekuatan material.

Oleh karena itu, pemilihan metode fabrikasi yang tepat serta pemahaman terhadap perubahan mikrostruktur akibat proses pembengkokan menjadi sangat krusial dalam menjamin keandalan operasional pipa elbow *superheater*. Selain itu, pengujian non-destruktif dan karakterisasi mikrostruktur secara sistematis diperlukan untuk mendeteksi potensi cacat dini pada struktur pipa.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 3 perbandingan sampel yang berbeda menggunakan pipa elbow super heater pabrikan, pipa elbow super heater bending manual dan pipa elbow *superheater* bocor dengan menggunakan metode purposive sampling. Adapun alat dan bahan yang digunakan:

- 1) Penggaris
- 2) Mesin potong
- 3) Marker
- 4) Alat pengujian *metallography* dan struktur mikro
- 5) Pipa *elbow superheater* bending manual
- 6) Pipa *elbow superheater* bending pabrikan
- 7) Pipa *elbow superheater* bocor

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 2 jenis data penelitian yaitu data penelitian utama (primer) dan data pendukung (sekunder). Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium terhadap tiga sampel pipa elbow *superheater*, yaitu: pipa pabrikan (tanpa perlakuan bending), pipa hasil *manual*

bending, dan pipa bocor akibat kegagalan operasi. Sampel diambil dengan metode purposive sampling berdasarkan kondisi aktual di lapangan.

Prosedur pengujian diawali dengan preparasi sampel menggunakan metode metalografi, dilanjutkan dengan etsa menggunakan larutan Nital 2%. Struktur mikro diamati melalui mikroskop optik dengan pembesaran 200× untuk mengidentifikasi fasa ferit dan perlit serta mengevaluasi ukuran butir. Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan dua teknik:

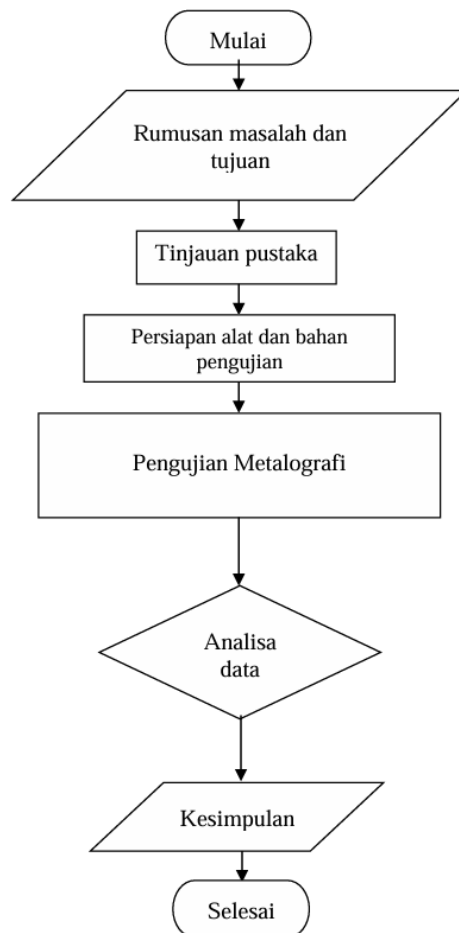
- 1) Metode Point Count, untuk menghitung persentase perlit dan ferit berdasarkan jumlah titik pada grid yang mengenai masing-masing fasa.

$$\text{persentase fasa (\%)} = \frac{(\text{jumlah grid full} \times 1) + (\text{jumlah grid setengah} \times \frac{1}{2})}{\text{jumlah seluruh grid}} \times 100\%$$

- 2) Metode Intercept (Hilliard), untuk menentukan ukuran butir (*grainsize*) berdasarkan jumlah perpotongan garis lurus terhadap batas butir mikrostruktur.

Seluruh pengujian mengacu pada standar ASTM E112 dan ASTM E562. Hasil pengamatan digunakan untuk menganalisis pengaruh proses *bending* terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik material pipa elbow.

Gambar 1 menunjukkan langkah penelitian dalam bentuk diagram alir.

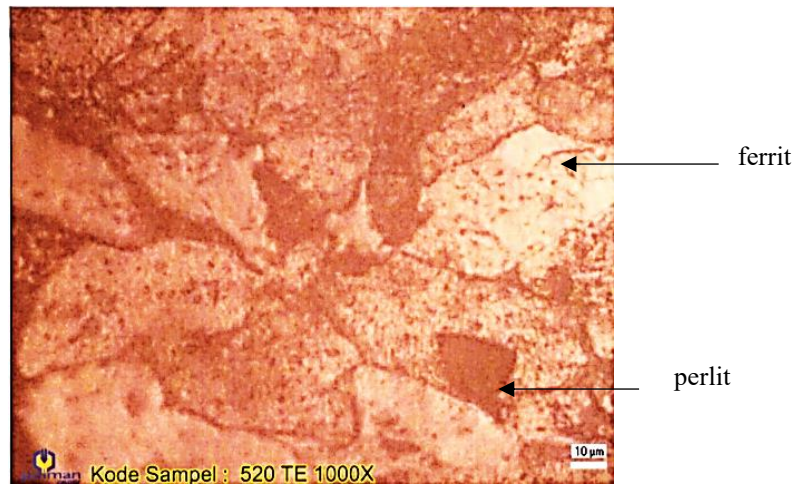


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil Dan Pembahasan

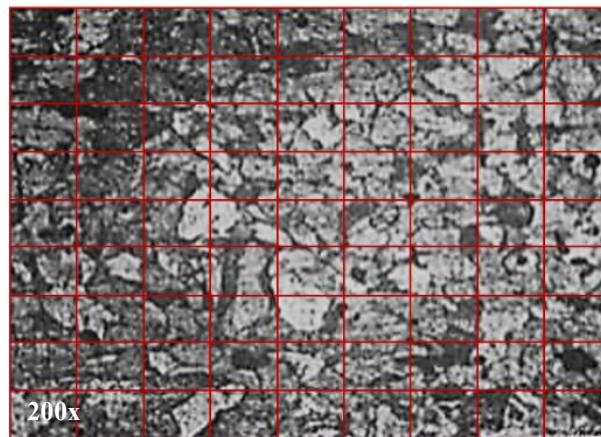
Berikut hasil pengujian struktur mikro dari beberapa sampel pipa *elbow super heater*:

1. Pipa *elbow super heater* pabrikan



Gambar 4. Hasil Pengujian Metalografi Pipa *Elbow Superheater* Pabrikan

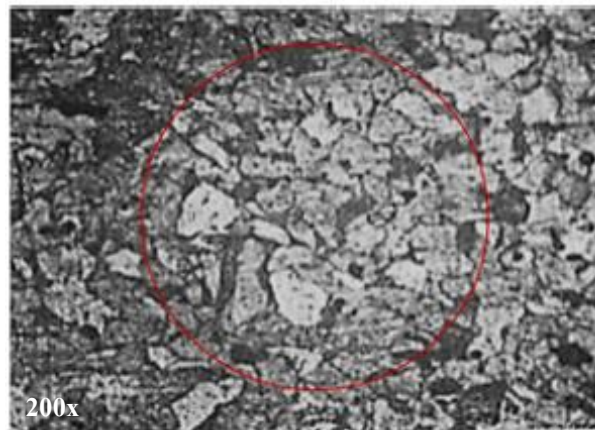
Berikut hasil perhitungan persentase fasa pada material pipa *elbow* pabrikan:



Gambar 5. Perhitungan Fasa Pada Material Pipa *Elbow*

$$Fasa\ Perlit\% = \frac{(46 \times 1) + (15 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 66,05\%$$

$$Fasa\ ferrit\% = \frac{(23 \times 1) + (9 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 33,95\%$$



Gambar 6. Grainsize Pipa Elbow Superheater Bending Manual

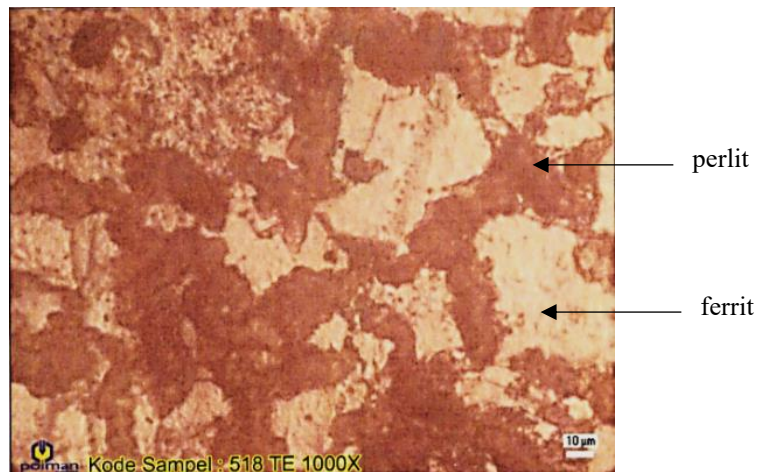
LT = Keliling lingkaran = 31,4 cm
 P = Total Jumlah butiran = 83 titik
 M = perbesaran = 200 kali

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{LT}{P \cdot M}$$

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{31,4}{83 \cdot 200}$$

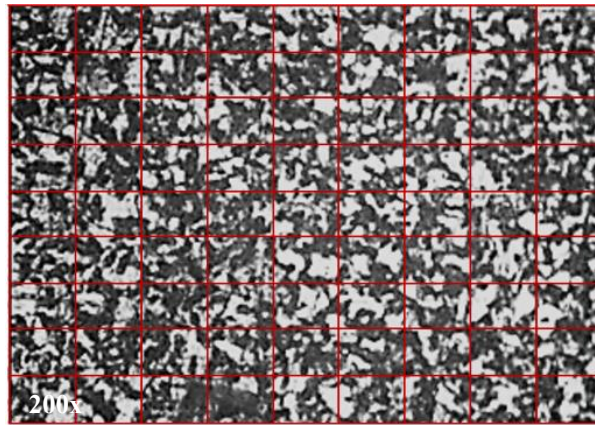
$$G = 8,0819$$

2. Pipa elbow super heater bending manual



Gambar 7. Hasil Pengujian Metalografi Pipa Elbow Superheater Bending Manual

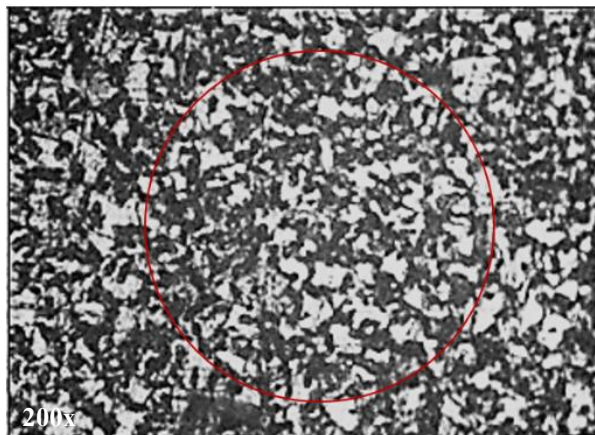
Berikut hasil perhitungan persentase fasa dan *grainsize* pada material pipa elbow super heater bending manual:



Gambar 8. Perhitungan Fasa Pada Material Pipa *Elbow Superheater Bending Manual*

$$\text{Fasa Perlit}\% = \frac{(25 \times 1) + (38 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 54,32\%$$

$$\text{Fasa ferrit}\% = \frac{(25 \times 1) + (24 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 45,67\%$$



Gambar 9. Grainsize Pipa *Elbow Superheater Bending Manual*

LT= Keliling lingkaran = 31,4 cm

P= Total jumlah butiran = 62 titik

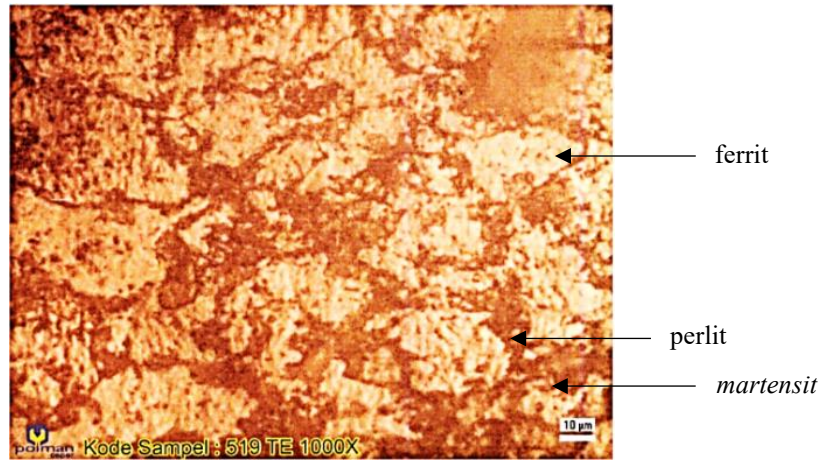
M = perbesaran= 200 kali

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{LT}{P \cdot M}$$

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{31,4}{62 \cdot 200}$$

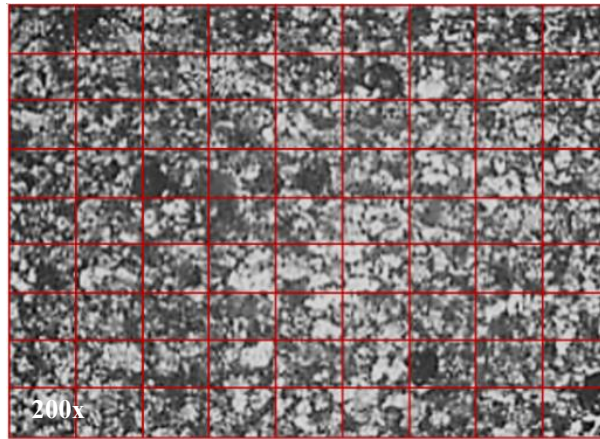
$$G = 7,24071$$

3. Pipa *elbow super heater* bocor



Gambar 10. Hasil Pengujian Metalografi Pipa *Elbow Superheater* Bocor

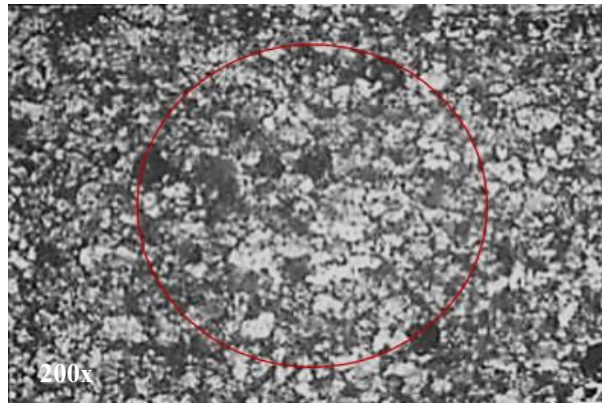
Berikut hasil perhitungan persentase fasa dan *grainsize* pada material pipa elbow super heater bocor :



Gambar 11. Perhitungan Fasa Pipa *Elbow Superheater* Bocor

$$Fasa\ Perlite\% = \frac{(32 \times 1) + (11 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 46,30\%$$

$$Fasa\ ferrit\% = \frac{(40 \times 1) + (6 \times \frac{1}{2})}{100} \times 100\% = 53,70\%$$



Gambar 12. Grainsize Pipa Elbow Superheater Bocor

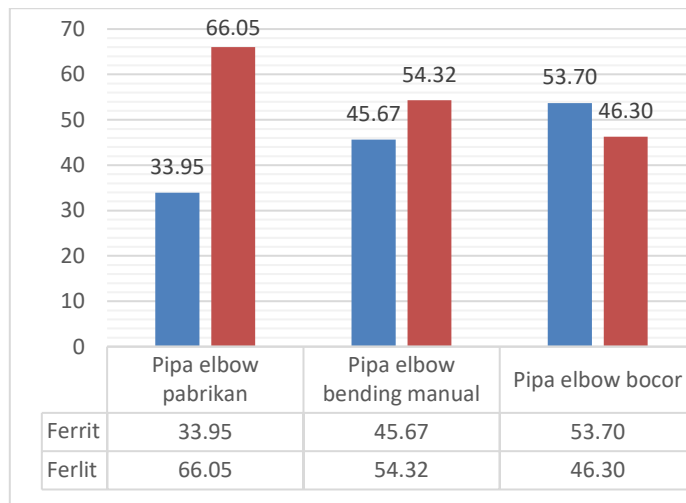
LT = Keliling lingkaran = 31,4 cm
 P = Total jumlah butiran = 66 titik
 M = perbesaran = 200 kali

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{LT}{P \cdot M}$$

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{31,4}{66 \cdot 200}$$

$$G = 7,421$$

Gambar-gambar yang ditampilkan pada penelitian ini, secara sistematis digunakan untuk memperkuat analisis terhadap perubahan struktur mikro dan ukuran butir pada ketiga sampel pipa elbow superheater. Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian metalografi pada pipa pabrikan, yang memperlihatkan dominasi fasa perlit sebesar 66,05% dan ferit sebesar 33,95%, sebagaimana diperkuat oleh perhitungan fasa pada Gambar 5. Hasil perhitungan ukuran butir pada sampel ini ditunjukkan pada Gambar 6, dengan nilai rata-rata grain size sebesar 8,08 μm , yang mencerminkan struktur mikro yang seragam dan tidak terdeformasi. Gambar 7 dan Gambar 8 menampilkan struktur mikro dan perhitungan fasa pada pipa hasil bending manual, dengan kandungan perlit sebesar 54,32% dan ferit sebesar 45,67%. Pada sampel ini, grain size mengalami penyusutan menjadi 7,24 μm sebagaimana disajikan pada Gambar 9, mengindikasikan adanya deformasi plastis akibat proses pembungkakan. Sementara itu, Gambar 10 hingga Gambar 12 menggambarkan hasil metalografi, distribusi fasa, dan ukuran butir pada pipa bocor, dengan kandungan perlit menurun hingga 46,30% dan ferit meningkat menjadi 53,70%, serta ukuran butir rata-rata sebesar 7,42 μm . Selain itu, terdapat juga indikasi awal pembentukan fasa martensit yang menandakan terjadinya overheating lokal pada saat operasi. Perbandingan seluruh hasil pengujian antar sampel divisualisasikan dalam Gambar 13 dan Gambar 14, yang menyajikan grafik kandungan fasa mikro serta variasi ukuran butir secara komprehensif. Data tersebut menunjukkan bahwa perlakuan mekanis (bending) maupun beban termal berlebih secara nyata memengaruhi degradasi struktur mikro dan sifat mekanik pipa elbow superheater.



Gambar 13. Grafik Struktur Mikro dan Perhitungan Fasa Pipa *Elbow Superheater*

Dari gambar 13 dapat kita lihat dan amati pipa elbow *superheater* yang memiliki nilai perlit tertinggi adalah sampel pipa elbow 90° *superheater* produksi pabrikan dengan nilai kandungan perlit sebesar 66,05%, kemudian nilai kandungan perlit teringgi kedua adalah sampel pipa elbow 90° *superheater* bending manual dengan kandungan 54,32%, sedangkan sampel dengan kandungan perlit terendah adalah pipa elbow *superheater* yang bocor atau rusak dengan kandungan nilai perlit sebesar 46,30%.

Kemudian untuk kandungan ferrit dalam hasil pengujian metalografi didapatkan kandungan ferrit tertinggi adalah sampel elbow 90° *superheater* bocor dengan nilai sebesar 53,70 %, kemudian kandungan ferrit terbanyak kedua adalah sampel pipa elbow 90° *superheater* manual dengan nilai kandungan ferrit sebesar 54,32% dan terakhir kandungan sampel pipa elbow 90° *superhater* pabrikan dengan nilai kandungan fasa ferrit terendah sebesar 33,95%.

Pengamatan terhadap tiga sampel menunjukkan perbedaan yang cukup besar pada struktur mikro akibat perlakuan yang diterima masing-masing pipa. Pada pipa pabrikan, struktur mikro menunjukkan dominasi fasa perlit sebesar 66,05% dan ferit sebesar 33,95%. Perbandingan ini menunjukkan proporsional dari mikrostruktur baja karbon yang masih berada dalam kondisi ideal untuk operasi pada temperatur tinggi, hal ini dikarenakan perlit berkontribusi terhadap kekuatan dan ferit terhadap keuletan material.

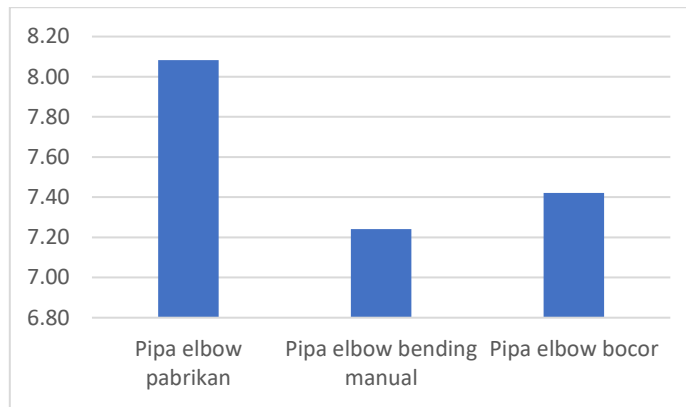
Berbeda dengan pipa pabrikan, pipa hasil manual bending menunjukkan penurunan kandungan perlit menjadi 54,32% dan peningkatan ferit menjadi 45,67%. Perubahan ini menunjukkan terjadinya re-organisasi mikrostruktur akibat pembebanan plastis selama proses bending. Penurunan jumlah fasa ferlit memberikan indikasi dekomposisi fasa yang terjadi pada sebagian fasa ferlit menjadi ferrit. Hal ini menyebabkan penurunan kekuatan mekanik. Selain itu, tidak ditemukan indikasi pembentukan martensit, yang menandakan bahwa meskipun deformasi terjadi, tidak ada peningkatan kekerasan ekstrem pada sampel ini.

Pada pipa bocor, kandungan perlit turun lebih lanjut menjadi 46,30%, sementara ferit meningkat hingga 53,70%. Fenomena ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Hosseini dan Yareiee (2019), yang menunjukkan bahwa overheating jangka pendek dapat menyebabkan perubahan fasa yang tajam dan berujung pada keretakan akibat ketidakseimbangan sifat mekanik antar fasa.

Selain itu, Ukuran butir (*grain size*) juga mengalami perubahan pada pipa hasil bending dan pipa bocor. Berdasarkan perhitungan menggunakan metode intercept, pipa pabrikan menunjukkan ukuran butir yang seragam dan lebih halus dibandingkan dua sampel lainnya. Proses bending menyebabkan butiran menjadi lebih besar akibat regangan plastis dan pemanasan lokal selama proses pembentukan. Pada pipa bocor, *grainsize* menunjukkan distribusi tidak seragam dengan indikasi pertumbuhan abnormal, proses re-kristalisasi tidak sempurna yang memperlemah struktur pada zona kritis.

Hasil pengukuran ukuran butir (*grain size*) pada gambar 14 menunjukkan bahwa pipa elbow pabrikan memiliki ukuran butir rata-rata terbesar yaitu 8,08 μm , diikuti oleh pipa bocor sebesar 7,42 μm dan pipa hasil bending manual sebesar 7,24 μm . Perbedaan ini mengindikasikan bahwa proses *manual bending* menyebabkan penyempitan ukuran butir akibat deformasi plastis yang tinggi, namun tidak diikuti oleh *recovery* atau *recrystallization* sempurna. Sementara itu, ukuran butir pada pipa bocor sedikit lebih besar dari pipa hasil

bending, kemungkinan akibat overheating lokal selama operasi yang memicu pertumbuhan butir abnormal. Data ini mendukung temuan struktur mikro sebelumnya, bahwa perlakuan mekanis dan termal yang tidak terkendali dapat mengubah struktur mikro secara signifikan dan mempercepat penurunan performa material pipa *superheater*.



Gambar 14. Perbandingan ukuran butir pipa elbow bending pabrikan, manual, dan bocor

Perubahan ini memperkuat hasil penelitian Lian et al. (2023), yang menemukan bahwa perlakuan termal siklik dan tekanan dari fluida dua fasa dapat menyebabkan *ratcheting effect*, pelemahan struktur mikro, dan akhirnya kebocoran pada sambungan tee atau elbow pipa.

Secara keseluruhan, terlihat bahwa struktur mikro sangat berpengaruh terhadap performa dan ketahanan pipa. Penurunan fasa perlit, pembesaran ukuran butir, dan kemungkinan munculnya fasa martensit mempercepat penurunan sifat mekanik, khususnya ketahanan terhadap tekanan dan temperatur tinggi. Dalam hal ini, perlakuan manual bending tanpa kontrol suhu dan deformasi yang akurat berkontribusi signifikan terhadap penurunan kualitas pipa.

Hasil ini searah penelitian dengan penelitian Yudanto et al. (2021) yang menyatakan bahwa ketidakteraturan struktur mikro akibat pembebanan lokal dan aliran fluida dua fasa mempercepat kegagalan pada komponen elbow pipa di lingkungan PLTU.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis terhadap kondisi fisik sampel uji, dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa faktor utama yang menjadi penyebab kegagalan pada pipa elbow *superheater*. Penyebab pertama, kandungan perlit tertinggi ditemukan pada pipa elbow *superheater* pabrikan, yaitu sebesar 53,50%. Kandungan perlit yang tinggi ini berperan penting dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan material terhadap beban kerja pada temperatur tinggi. Selanjutnya, proses bending manual yang diterapkan pada pipa menyebabkan berkurangnya kekerasan material. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya tarik selama proses pembengkokan yang mengakibatkan renggangnya ikatan antar unsur mikrostruktur, sehingga menurunkan kerapatan material. Peningkatan kandungan fasa ferit yang signifikan pada pipa hasil bending dan pipa bocor turut memperlemah ketahanan mekanik pipa, terutama dalam menahan tekanan internal. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan struktur mikro akibat perlakuan mekanis tanpa kontrol yang tepat dapat memicu degradasi sifat material dan mempercepat terjadinya kegagalan fungsional pada komponen pipa *superheater*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adrian J., Latif, N., Noerochim, L., Kurniawan, B.A., (2016). Analisa Kerusakan Superheater Tube Boiler Tipe ASTM A213 Grade T11 pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Jurnal Teknik ITS, 5(2): F148-F152. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18561>
- [2] Antono, V., Alfalah, W., Windani, R., (2018). Analisa Kegagalan Platen Tube Superheater PLTU Teluk Sirih. Jurnal Powerplant, 6(1), 6–18. <https://doi.org/10.33322/powerplant.v6i1.67>

- [3] Chudhoifah, M. N., Suastiyanti, D., & Rupajati, P. (2020). Analisa Kerusakan Pipa Boiler Super Kritikal. *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 4(1), 24. <https://doi.org/10.31543/jtm.v4i1.334>
- [4] Fadhli, F., & Madjid, S. (2017). Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Belokan Pipa (Elbow) Terhadap Kecepatan Aliran Fluida Dan Kerugian Tekanan. *ILTEK : Jurnal Teknologi*, 12(01), 1717–1721. <https://doi.org/10.47398/iltek.v12i01.399>
- [5] Hosseini, R. K., & Yareice, S. (2019). Failure analysis of boiler tube at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis*, 106, 104146. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104146>
- [6] Imami T.G. (2010). Analisis Struktur Mikro Baja Tulangan Karbon Sedang. Pp: 2-7
- [7] Kalugin, P. N., Anokhov, A. E., Fedina, I. V., Kreitser, K. K., Dudarev, I. D., & Dudka, G. A. (2021). Study of pipe bend metal prepared by electroslag melting of steel 15Kh1M1F-Sh and intended for thermal power plant steam lines. *Power Technology and Engineering*, 54(6), 889–895. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01303-5>
- [8] Kiagus M. Rizky Khadafi, Hendradinata, H., Fenoria Putri, & Ogi Meita Utami. (2024). Analisis Kegagalan Pipa Embedded Pada PLTU TE 3X10 MW . *MACHINERY Jurnal Teknologi Terapan*, 5(2), 48–55. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12735933>
- [9] Lian, W., Sun, Z., Lyu, Y., & Duan, Z. (2023). Cause analysis of condensed water induced bulging in high-pressure steam tee joints of a pyrolyzer. *Processes*, 11(8), 2288. <https://doi.org/10.3390/pr11082288>
- [10] Lubis, A., Tanti, N., (2010). Analisis Limit Momen Pipa Elbow dengan Beban In-Plane Banding. *Jurnal Mechanical*. 1(1):36-42
- [11] Lukito, N. A., P. Hidayat, M. I., & Nurdiansah, H. (2016). Analisa Kegagalan Pipa Desuperheater Spray pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 4 PT. PJB UP. Gresik. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18236>
- [12] Renatasari, F.A., Yudo, H., Mulyatno I.P., (2017) Analisis Kekuatan Pipa Elbow 90° dengan Variasi D/T pada Pipiline Akibat Beban Bending. *Jurnal Teknik Perkapalan* 5(4): 858-863. Retrieved from <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/18847>
- [13] Rofiq A, Baharuddin, Husni A. (2022). Analisa Penggunaan Vortex Generator pada Elbow Pipa untuk Mengurangi Laju Erosi pada Sistem Perpipaan Kapal. *J Ris Teknol Terap Kemaritiman*. 1(2):47–54.
- [14] Sasongko, G., & Nugroho, S. (2016). Analisis Kegagalan Pipa Elbow 180° Pada Furnace. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(2), 234-240. Retrieved From <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/12864>
- [15] Sutowo, C. (2019). Analisa Kegagalan Retak Pada Pipa Fitting Baja Karbon Jenis Tee. *Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi (Jiptek)*, 1(1), 37–43. <https://doi.org/10.32493/jiptek.v1i1.3525>
- [16] Tafrant, D., Hendradinata, H., Mulyadi, M., Sampurno, R. D., Sani, A. A., Karmin, K., ... Fitriani, D. D. (2022). Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja AISI 1040 Sebagai Hasil Proses Quenching Menggunakan Pendingin Air Garam Dan Asap Cair. *MACHINERY Jurnal Teknologi Terapan*, 3(2), 62–68. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6857629>
- [17] Vermeij, T., & Hoefnagels, J. P. M. (2021). Plasticity, localization, and damage in ferritic-pearlitic steel studied by nanoscale digital image correlation. *Scripta Materialia*, 202, 114327. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114327>
- [18] Wahyu Endriyana V. (2013). Analisa Untuk Kerja Secondary Supeheater PLTGU Dan Evaluasi Peluang Peningkatan Effectiveness Dengan Cara Variasi Jarak, Jumlah, dan Diameter Tube. *J Tek ITS*. 2(3):B388–93.
- [19] Wicaksono, R., Ilman, M.N., (2018). Investigasi Kebocoran Pipa Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap 65 MW. *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri 2018*: 72-77
- [20] Yudanto, F. D., Arfi, A. A., Wahyudi, A. T., & Suwarno, S. (2021). Failure analysis of pipeline elbow connecting high pressure heater to deaerator in a steam power plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034, 012176. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012176>