
ANALISA KEGAGALAN PIPA ASTM A179 PADA RUANG BAKAR BOILER

Muhammad Furqan Maulana

Universitas Harapan Medan

Email: mhdfurqanmaulana@gmail.com

Abstract

This study aims to carry out an in-depth analysis of ASTM A179 pipe failures in the boiler combustion chamber. These pipes are vital components in the boiler system that often fail, which can result in large losses both economically and safety. Failure analysis methods are used to identify and understand the causes of pipe failure. The results showed that a number of factors played a role in the failure of this pipe, including corrosion, high operating pressures, and extreme temperatures in the boiler combustion chamber. In addition, an analysis of the microstructure and material composition of the pipe was also carried out to understand the structural changes that occurred during operation. The results of this analysis provide valuable insight into how these pipes degrade over time. By understanding the causes of these failures and structural changes, the development of more effective maintenance strategies can be recommended. The findings from this research have the potential to improve boiler system reliability and reduce the risk of pipe failure in the future. In addition, the use of pipe materials that are more resistant to harsh environmental conditions can be an important step in increasing the performance and service life of boiler pipes in industries that use boilers as the main component in their production processes.

Keywords : Analysis, Pipe Failure, Boiler Combustion Chamber.

Abstrak

Studi ini bertujuan untuk melakukan analisis mendalam terhadap kegagalan pipa ASTM A179 yang terdapat pada ruang bakar boiler. Pipa-pipa ini merupakan komponen vital dalam sistem boiler yang sering mengalami kegagalan, yang dapat mengakibatkan kerugian besar baik secara ekonomi maupun keselamatan. Metode analisis kegagalan digunakan untuk mengidentifikasi dan memahami penyebab kegagalan pipa tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sejumlah faktor berperan dalam kegagalan pipa ini, termasuk korosi, tekanan operasional yang tinggi, dan suhu ekstrem di dalam ruang bakar boiler. Selain itu, dilakukan pula analisis mikrostruktur dan komposisi material pipa untuk memahami perubahan struktural yang terjadi selama pengoperasian. Hasil analisis ini memberikan wawasan yang berharga tentang bagaimana pipa-pipa ini mengalami degradasi seiring waktu. Dengan memahami penyebab kegagalan dan perubahan struktural tersebut, pengembangan strategi pemeliharaan yang lebih efektif dapat direkomendasikan. Temuan dari penelitian ini memiliki potensi untuk meningkatkan kehandalan sistem boiler dan mengurangi risiko kegagalan pipa di masa mendatang. Selain itu, penggunaan bahan pipa yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras dapat menjadi langkah penting dalam meningkatkan kinerja dan masa pakai pipa boiler pada industri-industri yang menggunakan boiler sebagai komponen utama dalam proses produksi mereka.

Kata Kunci: Analisa, Kegagalan Pipa, Ruang Bakar Boiler.

Corresponding Author; Muhammad Furqan Maulana
E-mail: mhdfurqanmaulana@gmail.com



Pendahuluan

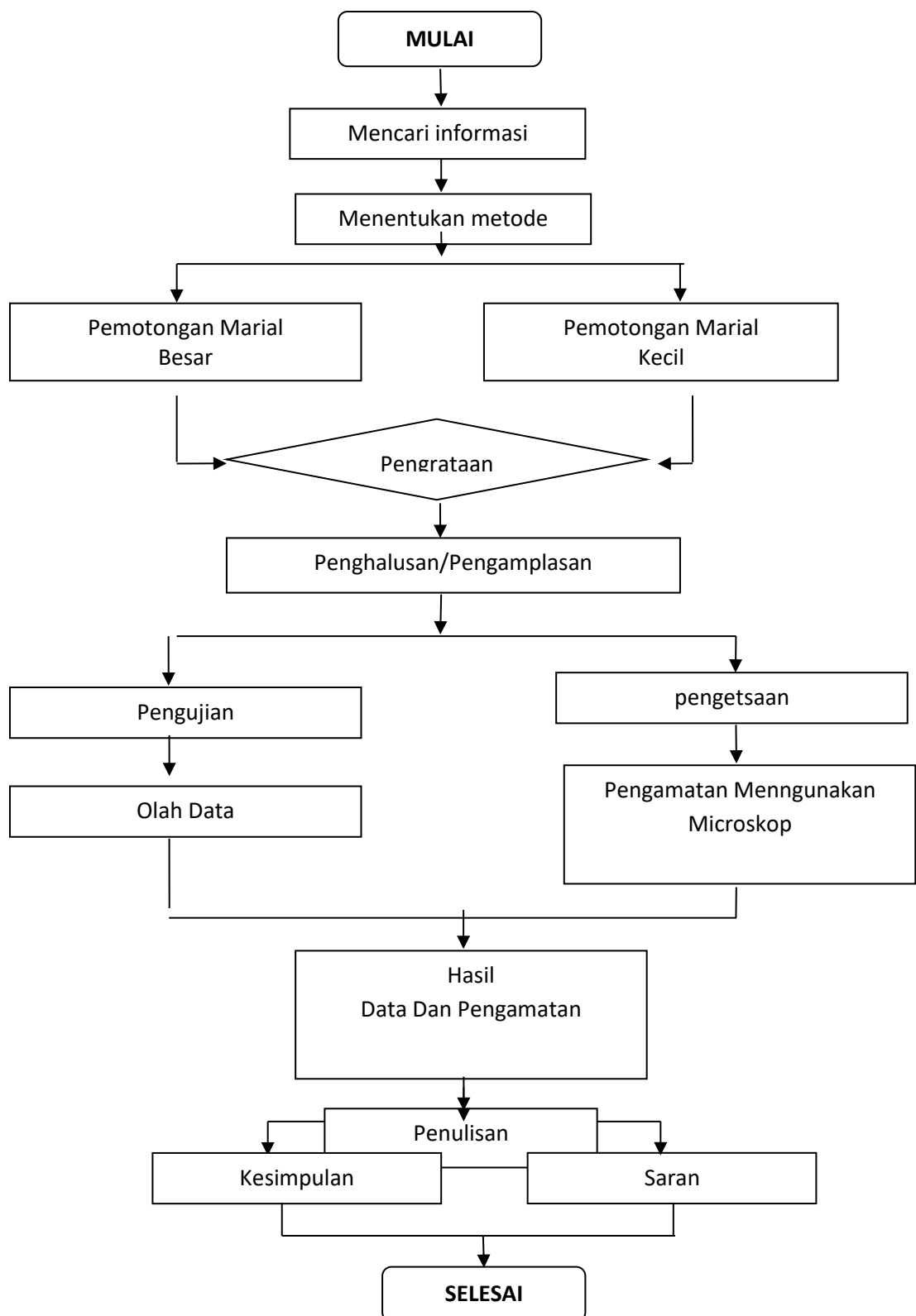
Di jamaan sekarang ini energy sangat di butuhkan, dan alat untuk penghasil energy itu sendiri tidak lepas dari beberapa susunan komponen, di dalam suatu komponen terdapat matrial. Salah satunya pembangkit listrik tenaga uap atau yang lebih di kenal dengan boiler atau ketel uap, ketel uap itu sendiri memiliki komponen utama yaitu pipa yang di gunakan untuk mensirkulasikan air pipa itu sendiri terbuat dari matrial logam, pada proses pengoprasian boiler, maka pipa yang ada di dalam dapur bakar boiler mengalami perubahan suhu yang mengakibatkan terjadinya Deformasi yang mengakibatkan perubahan sifat mekanik dari matrial pipa tersebut (Efendi, 2021).

Sifat mekanik tersebut terutama meliputi kekerasan, keuletan, kekuatan, ketangguhan, serta sifat yang baik (Nc & Paltiraja, 2013). Dengan sifat pada masing-masing material berbeda, maka banyak metode untuk menguji sifat apa sajakah yang dimiliki oleh suatu material tersebut. Uji hardnes merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui kekuatan, kekerasan, material, dan bagaimana bentuk struktur pada logam tersebut, Oleh karena itu uji hardness dan uji struktur banyak dipakai dalam bidang menguji sifat mekanik yang dimiliki oleh suatu material tersebut (Rauf et al., 2018).

Uji hardness adalah pengujian satu sifat mekanik (*Mechanical properties*) dari suatu material (Nasution & Irawan, 2020). Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mangalami pergesekan (*frictional force*) dan deformasi plastis (MAHFUDI, 2019). Deformasi plastis sendiri suatu keadaan dari suatu material ketika material tersebut diberikan gaya maka struktur mikro dari material tersebut sudah tidak bisa kembali ke bentuk asal artinya material tersebut tidak dapat kembali ke bentuknya semula (Trihutomo, 2015). Lebih ringkasnya kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban identasi atau penetrasi (penekanan).

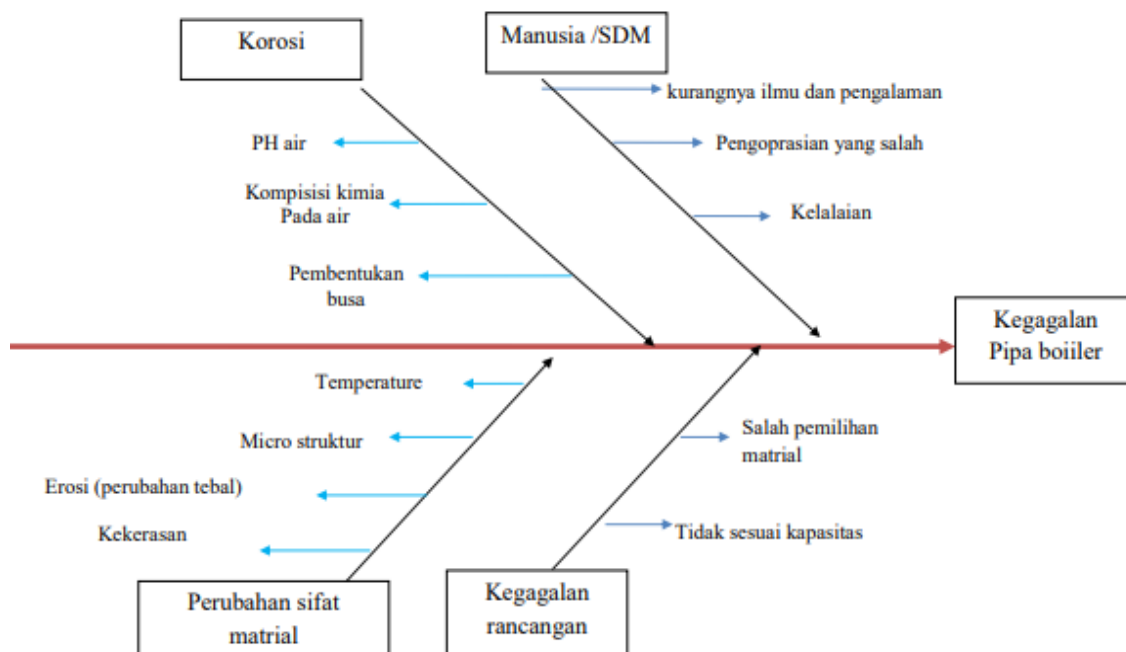
Metode Penelitian

Diagram III Alir

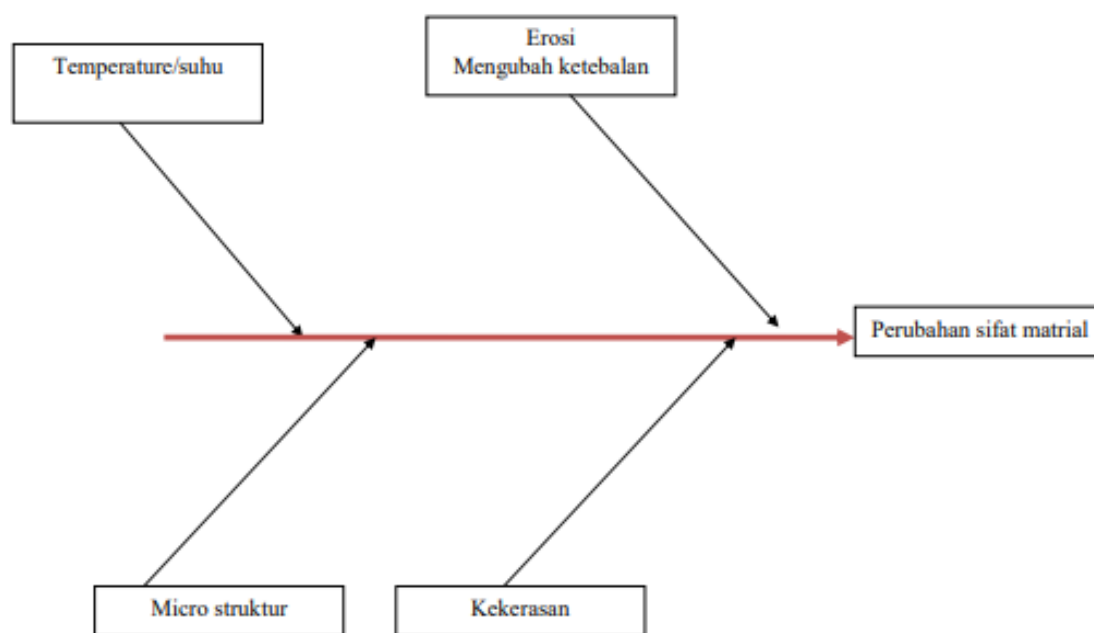


Penjelasan:

Diagram alir di atas menggambarkan bagaimana proses penulis dalam pengumpulan data dan informasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.



Berdasarkan fishbone diagram di atas, menunjukkan faktor penyebab terjadinya pecah dan kebocoran pada pipa boiler yang disebabkan oleh thermal fatigue pada material yakni, perubahan sifat. Untuk membuktikan bahwa kebocoran pipa boiler karena perubahan sifat pada material pipa, maka dibutuhkan analisis lebih lanjut. Berikut analisis menggunakan fishbone diagram:



Metode Penelitian

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan beberapa pengujian dengan tujuan mengetahui kekerasan matrial pipa boiler (Apriana, 2020). Pengujian yang dilakukan adalah pengujian struktur mikro, dan nilai kekerasan, yang akan diterangkan pada diagram alir pada sub bab dibawah ini (Ayuni & Sugati, 2020).

Bahan Dan Peralatan

Bahan yang di gunakan pada peroses ini adalah pipa yang belum mengalami proses pembakaran (standar) dan yang sudah mengalami proses pembakaran pada ruang bakar.

Specimen	Diameter dalam	Diameter luar
A	40mm	50mm
B	Tidak rata	50mm

Table 3. 1ukuran matrial pipa boiler yang di teliti

Keterangan:

Bahwa ukuran awal dari matrial standar ini memiliki diameter dalam 40mm dan diameter luar sebesar 50mm, pada saat proses pembakaran matrial mengalami perubahan dari krak, korosi dan gesekan dari fluida yang mengakibatkan menipisnya permukaan pada lubang pipa bagian dalam.



Gambar 3. 1 pengukuran pipa

Bahan

Bahan yang di guakan penulis dalam proses pencarian data adalah:

Potongan pipa sebelum di gunakan pada boiler pabrik serta memotong dalam ukuran yang lebih kecil untuk mempermudah dalam proses pencarian data.



Gambar 3. 2 hasil pemotongan pipa standar menjadi lebih kecil

Potongan Pipa Yang Sudah Mengalami Aktifitas Pembakaran Pada Ruang Bakar Boiler.



Gambar 3. 1 tidak standar

Larutan Kimia Untuk Proses Pengetsaan

Etching tujuan dari etsa ini adalah untuk meningkatkan visibilitas optik dari struktur mikro material logam sehingga mudah untuk menentukan grain size dan identifikasi fasa (Shidik & Sidiq, 2022). Larutan etsa dipilih berdasarkan komposisi, stress, atau struktur kristal. Teknik etsa yang banyak digunakan adalah chemical etching, teknik lain yang juga dapat digunakan seperti molten salt, electrolytic, serta thermal, plasma dan magnetic etching juga telah digunakan untuk aplikasi khusus (Setiadi & Toruan, 2022). Chemical etching, yaitu menggunakan larutan kimia yang bersifat asam atau basa dengan oxidizing atau reducing agents. Dapat dilakukan dengan cara immersion atau swabbing.



Peralatan

Alat yang digunakan untuk pengujian:

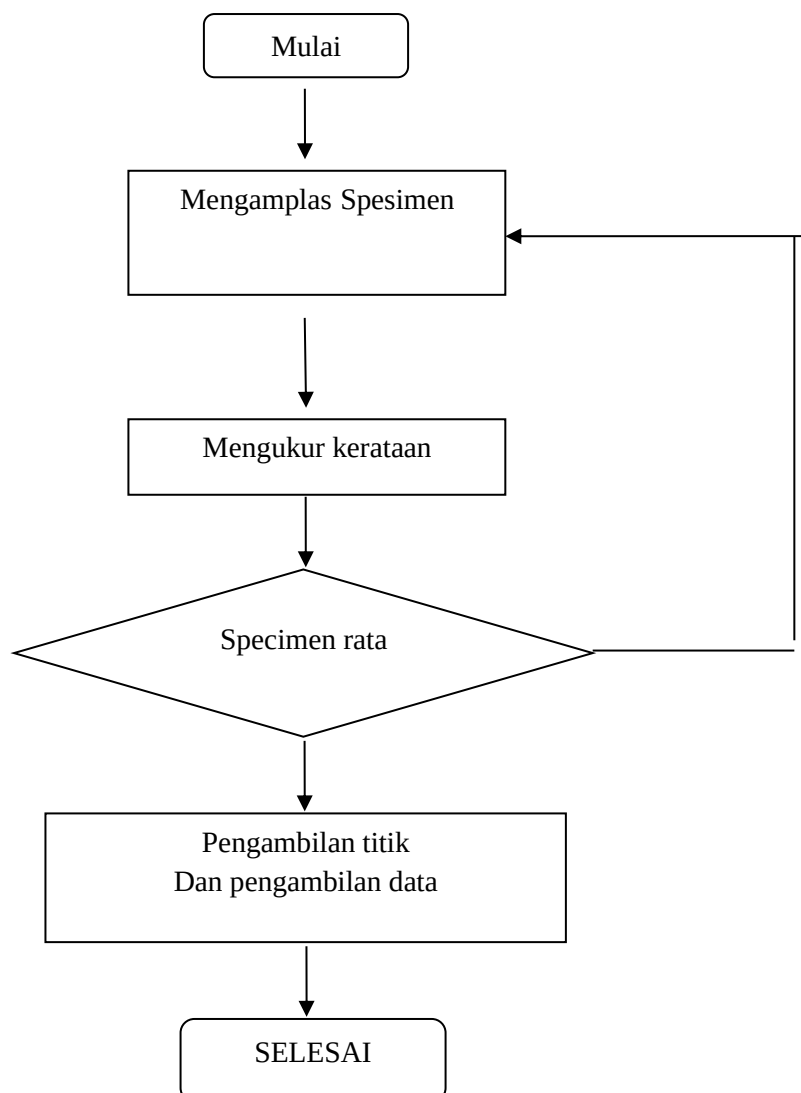
- Mesin uji kekerasan harnes
- Bola baja untuk untuk pengujian
- Mikroskop pengukur
- Stop watch
- Mesin gerinda
- Ampelas kasar dan halus
- Mikroskop

Uji Brinell

Pengujian Kekerasan digunakan untuk mengetahui kekerasan spesimen, pada saat diuji spesimen di polis kembali setelah itu di lakukannya pengujian brinell, pengujian dilakukan di Laboratorium Universitas Sumatra utara (USU)



Gambar 3. 2 alat uji Brinell



Gambar diagram percobaan uji brinell

Keterangan:

1. Pengamplasan spesimen Hal ini dilakukan untuk dapat menghaluskan dan meratakan permukaan pada spesimen uji, agar kerak hasil pemakaran sebelumnya pada spesimen menghilang dan mendapatkan kehalusan pada permukaannya. Pengamplasan spesimen menggunakan amplas ukuran 500, 800, 1000.
2. Pengukuran kerataan Pengukuran kerataan ini bertujuan untuk mendapatkan spesimen yang rata dan sejajar, supaya pada saat di uji tidak menimbulkan hasil yang berbeda karena efek dari benjolan permukaan. Proses pengukuran menggunakan mistar siku, jika spesimen blum sejajar maka spesimen kembali di amplas hingga permukaan sejajar atau rata
3. Polishing spesimen Spesimen yang sudah rata dapat langsung di polish supaya mengkilap, pada tahap ini dilakukan menggunakan kain bludru serta bahan polishnya menggunakan autosol supaya permukaanya mengkilap, setelah itu dibersihkan menggunakan pepsoden supaya bekas dari bahan polishnya bersih
4. Pengambilan titik Sebelum proses pengambilan titik kekerasan, terlebih dahulu mnentukan pemetaan pengambilan titiknya, setelah itu menentukan berat pembebanan dan lama pembebanan, Pengujian brinell, ini menggunakan matrial ASTM A179 yang sudah di ratakan menggunakan mesin pengamplas, pada saat pengujian ini di gunakan indentor bola yang berdiameter 10 mm dengan waktu penekanan selama 15 detik serta beban yang di pakai sebesar 1500 kg
5. Pengamatan, pengambilan data dan kesimpulan
Ditahap yang terakhir, setelah semua material logam diuji pengamatan di lakukan dengan alat bantu mikroskop yang memiliki dimensi ukur, dan seluruh data dimasukkan kedalam data pengamatan, dan membuat analisa, seperti membuat perbandingan data nilai antara bahan uji satu dengan yang lainnya, lalu membuat diagram masing-masing nilai dari bahan uji dan membuat kesimpulan dari semua percobaan uji yang telah dilakukan.

Pengujian Mikrografi

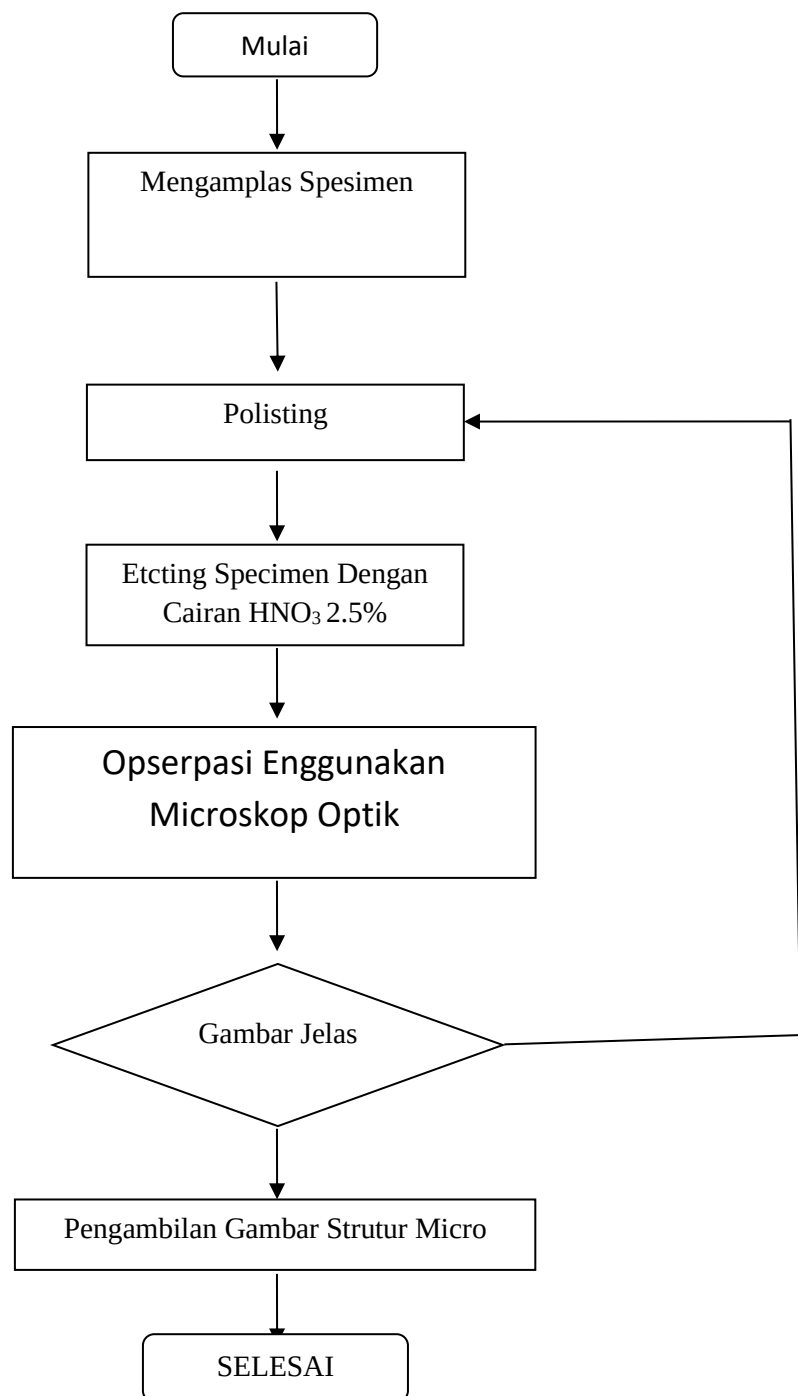
Pengujian mikrografi ini dilakukan dengan tujuan mengetahui struktur mikro pada matrial pipa boiler yang telah mengalami pemanasan di ruang bakar dan sebelum di pengaruhi oleh pembakaran dan membandingkan hasil struktur mikronya (Wijaya, 2020). Pengujian mikrografi ini dilakukan di Laboratorium Bahan Universitas Sumatra utara.



Gambar 3. 3 mikroskop optik

Tahap – tahap yang dilakukan pada pengujian mikrografi yaitu:

1. Mengamplas spesimen uji
2. Melakukan polishing
3. Melakukan etching menggunakan a. Larutan HNO₃ 2,5% + alkohol vol 75% b. Larutan aqua regia
4. Melakukan observasi menggunakan mikroskop optic
5. Melakukan pengambilan gambar
6. Mendapatkan gambar struktur mikro



Gambar Diagram alir pengujian mikrofafi

Keterangan:

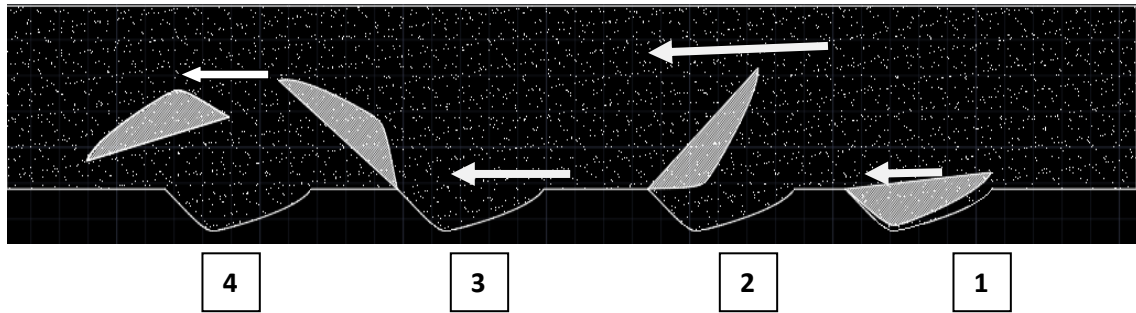
1. Pengamplasan spesimen Hal ini dilakukan untuk dapat menghaluskan permukaan pada spesimen uji, agar kerak pada spesimen menghilang dan mendapatkan kehalusan pada permukaannya. Pengamplasan spesimen menggunakan amplas ukuran 500, 800, 1000, 1200, 1500.
2. Polishing spesimen Proses polishing ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang mengkilap, supaya pada saat pengambilan gambar tidak terjadi gangguan pada gambar hasil struktur mikronya. Pada tahap ini dilakukan menggunakan kain bludru serta bahan polishnya menggunakan autosol supaya permukaannya mengkilap, setelah itu dibersihkan menggunakan pepsoden supaya bebas dari bahan polishnya bersih dan tidak menghalangi hasil gambar struktur mikronya.
3. Etching Etching pada spesimen ini menggunakan 2 larutan etsa yang berbeda, pada base metal baja karbon dan HAZ baja karbon menggunakan larutan HNO_3 2.5% yang dicampur dengan alkohol vol 100% dengan perbandingan 0,5 % HNO_3 dan sisanya alkohol. Sedangkan pada base metal, HAZ stainless steel, dan weld metal menggunakan etsa aqua regia yang merupakan paduan dari HNO_3 dan HCl dengan perbandingan 1:3. Proses etching ini bertujuan untuk menampilkan struktur mikro dan menampilkan batas – batas butirnya.
4. Observasi Mengamati gambar struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik, sehingga dapat melakukan pengambilan gambar struktur mikro, jika gambar belum sesuai atau masih ada gangguan, dapat dilakukan lagi proses polishing dan etching sampai gambar terlihat jelas.
5. Pengambilan gambar struktur mikro Setelah diamati gambar struktur mikro pada mikroskop sudah terlihat jelas, dapat dilakukan pengambilan gambar dengan metode capture di komputer yang dihubungkan pada mikroskop optik. Pengambilan gambar dilakukan sesuai pemetaan yang telah direncanakan.

Hasil dan Pembahasan**Erosi**

Penipisan permukaan pipa bagian lobang dalam di akibatkan oleh terjadinya oksidasi dari matrial yang di sebabkan oleh perubahan kimiawi matrial yang menyebabkan permukaan matrial menjadi lunak sehingga air yang memiliki laju dan tekanan dalam pipa mengantam dan mengangkat matrial yang telah lunak tersebut.

Di analogikan seperti gambar di bawah:

Di analogikan seperti gambar di bawah



Keterangan:

Ilustrasi di atas menerangkan bahwa material logam sudah mengalami proses oksidasi akibat dari proses kimiawi, pada saat fluida/air mengalir dengan laju dan tekanan maka akan berakibat permukaan pipa yang teroksidasi akan terbawa oleh derasnya laju fluida tersebut.

Analisa Pengujian Micro

Pada pengujian micro ini dilakukan untuk menentukan struktur mikroskopik yang hanya dapat dilihat menggunakan lensa dengan perbesaran tertentu. Perbesaran yang penulis gunakan pertama merupakan perbesaran 200x dan 500x pada bagian luar penampang pipa.

Spesimen A

Pada pengamatan menggunakan mikroskop optik di gunakan pembesaran lensa sebesar 200x sampai 500x pembesaran menggunakan material yang belum mendapatkan perlakuan panas.



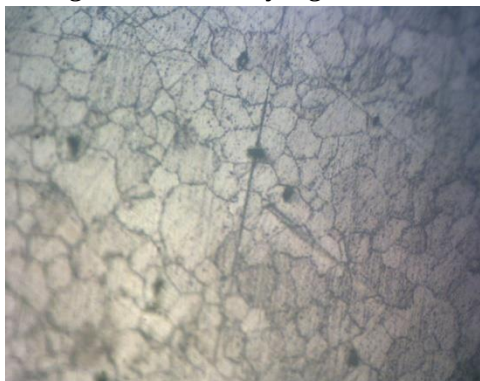
Gambar 4. 4specimen A menggunakan pembesaran 200x



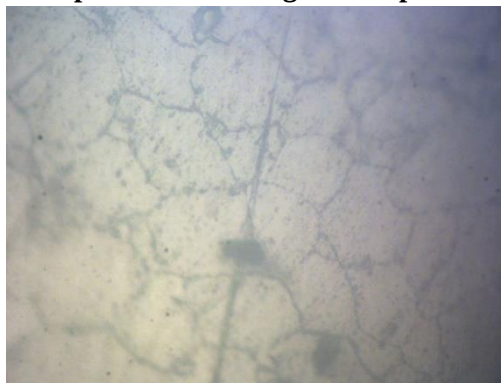
Gambar 4. 5 specimen A menggunakan pembesaran 500x

Spesimen B

Pada pengamatan menggunakan mikroskop optik digunakan pembesaran lensa sebesar 200x dan 500x pembesaran menggunakan material yang belum mendapatkan perlakuan panas.



Gambar 4. 6 specimen B menggunakan pembesaran 200x



Gambar 4. 7 specimen B menggunakan pembesaran 500x

Hasil analisa micro

Didapatkan dari gambar di atas, menjelaskan bahwa struktur mikro yang terbentuk merupakan struktur mikro ferrit dan pearlite. Di mana, pada area warna hitam menunjukkan area pearlite dan pada area yang berwarna putih menunjukkan area ferrit.

Di dalam gambar hasil pengujian metallography tersebut disimpulkan bahwa pipa yang mengalami kerusakan tersebut telah kehilangan banyak area pearlite. Banyaknya struktur mikro pearlite menunjukkan tingkat kekerasan sebuah material. Semakin banyak struktur mikro berupa pearlite, maka dapat dikatakan bahwa struktur benda tersebut akan memiliki tingkat kekerasan yang tinggi (Jurnal, 2018). Sedangkan, di dalam gambar hasil pengujian di atas menunjukkan area pearlite menghilang, sehingga dapat dikatakan bahwa pipa sudah mulai kehilangan tingkat kekerasannya dan pipa menjadi rentan mengalami kebocoran.

Pembentukan fase pada baja, seperti pearlite diakibatkan perlakuan panas (Yulianto, 2022). Perlakuan panas yang berbeda menghasilkan fase baja yang berbeda. Pipa boiler mengalami paparan panas terus menerus. Oleh sebab panas itu pula, fase pearlite yang sudah ada di baja pipa dapat berubah karena panas yang diterima dalam jangka panjang. Hal ini akan mengubah fase baja pearlite tersebut.

Pengubahan fase dari pearlite ke ferrit menyebabkan kekerasannya menurun, akibatnya rentan mengalami kebocoran, Pipa platen superheater dilalui uap yang panas dengan aliran yang cukup kencang, maka hal ini dapat menyebabkan tekanan yang tinggi di pipa. Ditambah dengan tikungan yang mengakibatkan gesekan dengan dinding lebih tinggi lagi. Oleh karena gesekan yang tinggi dan material yang berubah fase menjadi ferrit yang memiliki kekerasan yang kurang

dari pearlite, aliran uap mengikis elbow pipa tersebut (Jurnal, 2018). Oleh karena itu, kebocoran di elbow pipa platen superheater terjadi (lihat gambar 4.1).

Paduan yang tepat untuk meningkatkan ketahanan korosi adalah salah satu strategi yang mungkin untuk menangkali masalah korosi pipa.

Waktu pakai pipa akan lebih lama untuk paduan baja atau paduan paduan nikel yang lebih tinggi. Namun, efeknya menggunakan bahan paduan yang seperti ini tidak mudah diprediksi (efek seperti reaksi - reaksi kimia, dsb. di saluran dan turbin lanjutan dari saluran pipa).

Paduan dengan lebih sedikit zat besi dan banyak lagi nikel, kromium, molibdenum, dll. juga meningkatkan harga, sehingga pilihan menjadi kurang layak secara ekonomi.

Akan tetapi, jika efek yang terjadi dapat diprediksi, misal tidak menghasilkan senyawa yang merugikan (akan menimbulkan karat, dsb.), penerapan paduan seperti ini akan lebih menguntungkan secara ekonomi, kecuali jika sering terjadi fluktuasi suhu uap yang parah disebabkan seringnya kegagalan sensor, dsb. Penjelasan lain yang mungkin perlu ditambahkan adalah terjadinya lubang pipa berawal dari adanya kelelahan pada temperatur tinggi, yang mengakibatkan terbentuknya void - void (rongga - rongga kosong) pada material. Void - void ini akan saling bertemu dan bergabung membentuk retakan - retakan kecil (intergranular crack).

Retakan kecil (intergranular crack) yang bergabung akan membentuk retakan yang makin lama makin besar (Lukman Noerochim, n.d.). Karena banyaknya retakan, maka material ini menjadi rentan dan terjadi pelubangan material.



Gambar 4. 8 Material yang mengalami keretakan yang kemudian menjadi lubang

Tambahan penjelasan lainnya yang mungkin perlu ditambahkan adalah gagalnya pipa tersebut adalah creep akibat beroperasi pada temperatur dan tekanan yang tinggi (overheating) dengan waktu operasi yang lama dan diikuti pelunakan (annealing) sehingga terjadi erosi oleh fluida dalam pipa yang menyebabkan penipisan pada pipa hingga pipa tidak bisa menahan beban kerja dan terjadi kegagalan (failure) (Maulana, 2020).

Uji Brinell



Gambar 4. 9 pesimen yang mendapatkan perlakuan uji kekerasan brinell

Spesimen A

Pada pengujian brinell yang menggunakan matrial pipa berjenis ASTM A179 yang sebelum mendapatkan perlakuan panas, pipa ini berdiameter 2'' pengujian menggunakan indicator berdiameter 10 mm dan beban penekanan seberat 1500 kg dengan waktu penekanan selama 15 detik maka mendapatkan hasil diameter indentation sebesar yang tertera pada tabel berikut.

No	Diameter Indentation (mm)	Brinell Hardness Number (BHN)
1	4.0	114
2	4.1	109
3	3.9	121
4	3.5	151
5	3.6	142
6	3.4	156

DIAMETER INDENTOR = 4.41833
BRINEL HARDNESS NUMBWR = 132.167

Table 4. 1 hasil pengujian brinell specimen A

Spesimen B

No	Diameter Indentation (mm)	Brinell Hardness Number (BHN)
1	4.5	89.3
2	4.4	93.6
3	4.3	90.3
4	4.3	98.3
5	4.35	95.9
6	4.41	93.2

DAMETER INDENTOR = 4.37833
BRINELL HARDNESS NUBER = 120.5

Table 4. 1 hasil pengujian brinell specimen B

Pada pengujian brinell yang menggunakan matrial pipa berjenis ASTM A179 yang sudah mendapatkan perlakuan panas pada ruang pembakaran boiler sebesar $\pm 600^{\circ}\text{C}$, pipa ini berdiameter 2'' pengujian menggunakan indicator berdiameter 10 mm dan beban penekanan seberat 1500 kg dengan waktu penekanan selama 15 detik maka mendapatkan hasil diameter indentation sebesar yang tertera pada tabel berikut.

Data di atas di dapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\text{BHN} = \frac{P}{\frac{\pi}{2}D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

di mana,

BHN = nilai kekerasan material

P = gaya atau beban uji dalam kilogram gaya (kg).

D = diameter indenter bola dalam mm.

d = diameter jejak dalam mm.

Nilai rata rata perbandingan antar spesimen

Hasil dari pengujian brinell ini menunjukkan nilai rata-rata kekerasan sebesar yang tertera pada table berikut Gambar Table Specimen A dan b.

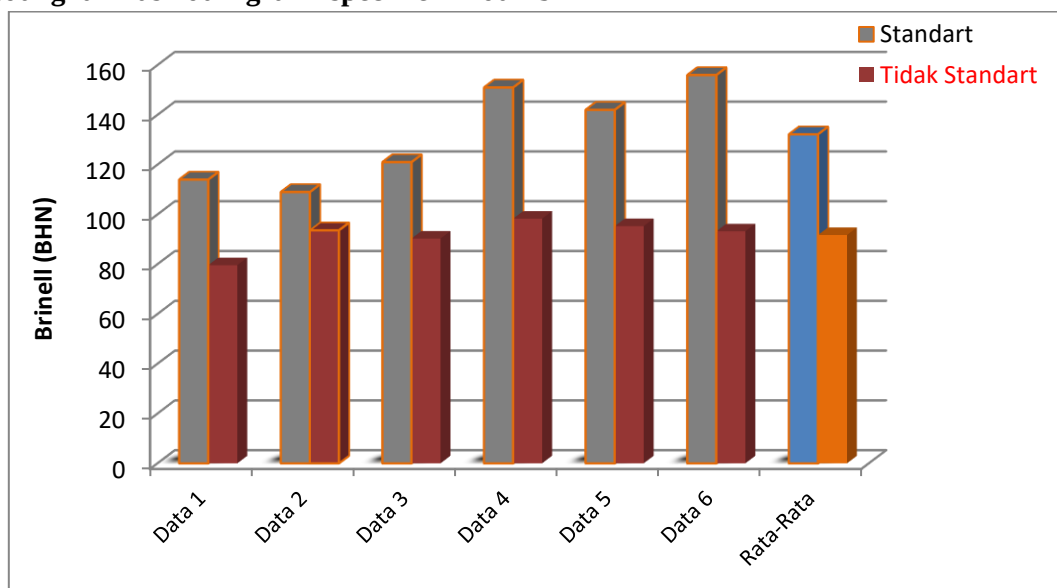
	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6	Rata-Rata
Standart	114	109	121	151	142	156	132.1667
Tidak Standart	79.6	93.6	90.3	98.3	95.3	93.2	91.71667

Table 4. 3 Nilai rata-rata hasil pengujian brinell

Nilai rata-rata ini di dapat menggunakan persamaan

$$\text{NILAI RATA - RATA} = \frac{\text{JUMBLAH NILAI}}{\text{BANYAKNYA DATA}}$$

Sedangkan hasil dari grafik specimen A dan b



Gambar 4. 10 grafik hasil perbandingan specimen

Berdasarkan Tabel dan grafik di atas terlihat bahwa nilai kekerasan mengalami penurunan, pada beban 1500 kgf. Nilai kekerasan mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan yaitu dari 132,1667 menjadi 91.81667 BHN. Bahwa penurunan kekerasannya hanya 0.43%.

Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan dengan menggunakan metode *hardness test* metalografi terhadap pipa jenis ASTM A179 diperoleh kesimpulan adalah sebagai berikut:

1. hasil pengujian metallography tersebut di simpulkan bahwa pipaa yang mengalami kerusakan tersebut telah kehilangan banyak area pearlite. Banyaknya struktur mikro pearlite menunjukan tingkat kekerasan sebuah material
2. sedangkan pipa standar masih memiliki cukup banyak area pearlite
3. Diperoleh nilai kekerasan rata-rata pada pipa ASTM A179 standar pada boiler dengan masing-masing pengujian *brinell*, sebesar 132.1667 BHN
4. Diperoleh nilai kekerasan rata-rata pada pipa ASTM A179 yang di pengaruh suhu ruang bakar boiler dengan masing-masing pengujian *brinell*, sebesar 91.71667 HRB,
5. Berdasarkan nilai hasil pengujian kekerasan pada pipa ASTM A179 standar membandingkan dengan setelah pemanasan mengalami penurunan kekerasan pada pengujian *brinell* sebesar 0.43%
6. Sedangkan hasil dari.

Daftar Pustaka

- Apriana, E. R. (2020). *Analisis Kegagalan Pada Pipa Stainless Steel AISI 304*. Fakultas Teknik Unpas.
- Ayuni, N. S., & Sugati, D. (2020). PENGARUH WAKTU PENAHANAN PROSES NORMALIZING PASCA LAS TERHADAP SIFAT MEKANIS LAS SMAW PADA BAJA KARBON RENDAH. *CENDEKIA MEKANIKA*, 1(01), 65–73.
- Efendi, S. R. (2021). *Analisis Pengaruh Unjuk Kerja Air Priheater Terhadap Efisiensi Boiler*. Universitas Medan Area.
- Jurnal, R. T. (2018). ANALISA KEGAGALAN PLATEN TUBE SUPERHEATER PLTU TELUK SIRIH: Vendy Antono, Win Alfalah, Rizky Windani. *JURNAL POWERPLANT*, 6(1), 6–18.
- Lukman Noerochim, S. T. (n.d.). *ANALISA KERUSAKAN SUPERHEATER TUBE BOILER TIPE ASTM A213 GRADE T11 PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP*.
- MAHFUDI, S. (2019). *ANALISA KEKUATAN BENDING DAN KEKERASAN PLASTIK DAUR ULANGJENIS HDPE (HIGH DENSITY POLYETHYLENE), PETE/PET (POLYPROPYLENE TEREPHTALATE) DAN PP (POLYPROPYLENE)*. Universitas Muhammadiyah Ponorogo.
- Maulana, H. (2020). *Analisa Unjuk Kerja Boiler Kapasitas 30 Ton Uap/jam Dengan Menggunakan Campuran Bahan Bakar Fiber dan Shell*. Universitas Islam Riau.
- Nasution, F. A. K., & Irawan, A. (2020). ANALISA KEGAGALAN PIPA ASTM A179 PADA RUANG BAKAR BOILER. *JiTEKH*, 8(2), 105–108.
- Nc, A. S., & Paltiraja, P. (2013). Analisis Welding Joint Performance Material ASTM SA 178 D Pada Waterwall Tube Boiler PLTU Paion Unit 1-400. *JURNAL POWERPLANT*, 1(1), 10–20.
- Rauf, F. A., Sappu, F. P., & Lakat, A. M. A. (2018). Uji Kekerasan dengan Menggunakan Alat Microhardness Vickers pada Berbagai Jenis Material Teknik. *Jurnal Tekno Mesin*, 5(1).
- Setiadi, B., & Toruan, L. M. D. L. (2022). Analisa Sifat Mekanis Velg Aluminium Sepeda Motor Menggunakan Metode Heat Treatment Dengan Variasi Waktu Kelipatan 3 Jam Pada Suhu Aging 150°C. *SAINSTECH: JURNAL PENELITIAN DAN PENGKAJIAN SAINS DAN TEKNOLOGI*, 32(4), 64–73.
- Shidik, M. A., & Sidiq, M. F. (2022). *DASAR METALURGI Pengetahuan Dasar dan Wawasan Ilmu Logam*. Badan Penerbit Universitas Pancasakti Tegal.
- Trihutomo, P. (2015). Pengaruh Proses Annealing Pada Hasil Pengelasan Terhadap Sifat

- Mekanik Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknik Mesin*, 22(1).
- Wijaya, A. (2020). *Analisa Variasi Komposisi Bahan Pengikat Terhadap Mikrostruktur dan Kekuatan Tekan Pelet Pasir Silika*. Universitas Islam Riau.
- Yulianto, S. (2022). ANALISA PENGARUH HARDENING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA S45C. *ISMETEK*, 14(1).