

BAB I. PENDAHULUAN UMUM

1.1. Latar belakang

Korosi memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, terutama pada material yang mengandung logam. Logam yang terkorosi mempengaruhi kualitas peralatan dan struktur yang mengandung logam (Su et al., 2024). Studi terbaru menunjukkan bahwa seiring dengan tren penggunaan baja yang meningkat secara signifikan pada fasilitas seperti jembatan, bagian anjungan minyak, dan fasilitas lepas pantai, paparan lingkungan laut dan sekitarnya memicu korosi di berbagai lokasi (Zhang et al., 2024).

Salah satu alasan yang paling sering menyebabkan kegagalan pada bagian mesin dan bangunan di berbagai fasilitas adalah korosi. Secara khusus, korosi intergranular dan retak korosi tegangan intergranular adalah mode kegagalan yang umum terjadi pada baja tahan karat yang telah disensitisasi secara termal dengan pengelasan (Fujii et al., 2022).

Sambungan las baja tahan karat rentan terhadap penggetasan, korosi intergranular, retak panas, dan pengembangan ferit delta yang tidak diinginkan di zona fusi. Kualitas mekanis sambungan, termasuk kekuatan tarik, kekuatan luluh, ketahanan benturan, kekerasan mikro, dan ketahanan korosi, berkurang ketika ada kekurangan seperti itu (Dak & Pandey, 2020).

Perencanaan awal yang baik dan pemilihan material yang tepat penting untuk mengurangi potensi masalah yang disebabkan oleh serangan korosi di masa depan (Gadioli et al., 2024). Baja tahan karat semakin muncul sebagai bahan bangunan utama dalam rekayasa struktural karena meningkatnya penekanan pada kinerja siklus hidup struktur. Karena sifat mekanik khusus baja tahan karat, seperti rasio kekuatan ultimate-to-yield yang tinggi, kurva tegangan-regangan nonlinier, dan keuletan yang tinggi, sambungan geser pangkuan baja tahan karat yang dibaut (Song et al., 2024)

Baja tahan karat austenitik 304 adalah salah satu jenis yang sering digunakan dalam konstruksi dan komponen permesinan karena ketahanan terhadap korosi dan sifat mekanik yang memadai (Bai et al., 2024). Namun demikian, ada keadaan dimana baja tahan karat austenitik rentan terserang korosi dikarenakan fenomenasensitisasi dimana logam chromium terkuras dan menjadi karbida kromium, menyisakan zona terkuras Chromium (Kolli et al., 2020).

Sensitisasi adalah proses yang mengurangi jumlah kromium bebas (Cr) dalam paduan dengan membentuk karbida kromium pada batas butir baja tahan karat (Bowden et al., 2023). Fenomena ini terjadi pada temperatur antara 550 dan 800 derajat Celcius (Javidi et al., 2020) (Tokuda et al., 2020). Teori penipisan kromium (Cr) menyatakan bahwa pengendapan terjadi pada batas butir oleh karbida kromium ketika terjadi di zona habis dengan kandungan Cr lebih rendah dari 12% (Dai et al., 2022).

Fenomena sensitisasi ini menjadi masalah yang paling mengkhawatirkan saat mengelas baja tahan karat karena selain menghidupkan kembali stres, juga akan berada pada suhu tinggi sensitisasi yang berarti menurunkan ketahanan baja tahan karat. Beberapa variabel lain seperti seperti cold work, ukuran butir, dan komposisi kimia juga mempengaruhi termodinamika dan kinetika produksi karbida pada batas butir dan penipisan kromium, yang pada gilirannya mempengaruhi tingkat derajat sensitifitas korosi (Parvathavarthini & Dayal, 2002). Salah satu upaya mengatasi sensitisasi adalah

dengan perlakuan panas, Dalam proses perlakuan panas dimana proses difusi, perubahan fasa, pemulihan (recovery), dan pembentukan kristal dapat sangat mempengaruhi karakteristik dan sifat logam (Yousefi Mehr & Toroghinejad, 2022). Masukan panas yang tepat melalui prosedur perlakuan panas dapat memberikan pengaruh yang baik pada struktur mikro dengan menyetabilkan kembali butir akibat kekurangan unsur kromium (Gonzaga et al., 2020) dan segera meningkatkan ketahanan korosi pada material (Rashid et al., 2012).

Penelitian menunjukkan bahwa proses perlakuan panas pada *stainless steel* berjalan pada suhu sekitar 900°C, karena suhu dimana sensitisasi terjadi pada kisaran 500°C hingga 900°C, dengan pendinginan cepat sebagai metode untuk mencegah sensitisasi ulang. Perlakuan panas setelah pengelasan (PWHT) dapat menghindari terjadinya sensitisasi dikarenakan pengendapan karbida pada batas butir lebih lambat (Gonzaga et al., 2020), pada penelitian yang dilakukan oleh Fatawy et al., ditemukan bahwa pada perlakuan panas pada temperatur 450°C selama 1 jam, material SS 304 dapat menimbulkan fenomena desensitisasi sehingga mengembalikan kekuatan bending material setelah tersensitisasi. Perlakuan panas penuaan (aging) juga memberikan efek desensitisasi baja tahan karat yang unik melalui pemulihan struktur mikro. Baja tahan karat yang di-*aging* pada tahap awal menunjukkan peningkatan derajat sensitisasi, namun, seiring dengan berjalannya penuaan, zona penipisan Cr akan cepat pulih karena meningkatnya difusi atom Cr dari matriks austenitik di dekat batas butir mengakibatkan penurunan derajat sensitisasi. (Wang et al., 2016).

Temperatur pemanasan yang lebih tinggi (600-650°C) mempercepat semua proses degradasi pada baja, seperti migrasi atom dan dislokasi, pemulihan dan rekristalisasi, pengerasan butir dan sub-butiran, serta pengerasan endapan dan reng martensit. Dengan bertambahnya waktu eksposur, elemen paduan substitusi, seperti Cr, Mo, V dan Mn, menggantikan Fe dalam karbida $M_{23}C_6$. Karena perubahan komposisi kimia dan pertumbuhan partikel karbida ini secara langsung berkaitan dengan difusivitas elemen paduan dan difusi mandiri besi, yang semuanya sangat bergantung pada suhu, maka perubahan ukuran partikel dan jarak partikel-ke-partikel (L) dapat diperkirakan. Hal ini menyebabkan ukuran partikel rata-rata yang lebih besar dan pengurangan jumlah partikel, yang keduanya memiliki efek negatif pada sifat mekanik baja (Godec & Balantič, 2016).

Penuaan yang dilakukan lebih lama, maka zona penipisan chromium akan lebih luas sehingga menurunkan derajat sensitisasi. Penuaan yang berkepanjangan selama 168 jam pada suhu 600 dan 650 °C, dan 8 jam pada suhu 700 °C, meningkatkan nilai arus reaktivasi (I_r) dari hasil pengujian DL-EPR (Double loop-electrochemical potentiokinetic reactivation) secara bertahap (0,0025, 0,0150 dan 0,0038 mA/cm²) yang disebabkan oleh penyebaran zona penipisan Cr selama penuaan (Wang et al., 2016). Perlakuan panas *aging* pada temperatur relatif rendah dengan waktu yang sangat lama selain menurunkan derajat sensitisasi juga dapat mengembalikan struktur mikro. Perlakuan *aging* selama 10.000 – 20.000 jam pada temperatur 595°C dan 650°C mengembalikan fasa delta ferrite menjadi sigma+austenit baik pada base metal maupun logam las baja tahan karat austenitik (Ummah, 2019).

Perubahan fasa *stainless steel* akibat pemanasan yang berkepanjangan banyak ditemui baik yang merupakan langkah rekayasa seperti perlakuan *aging*, ataupun terjadi

pada saat aplikasi seperti creep. Kedua hal itu menunjukkan kecenderungan terbentuknya fasa metal karbida. Contohnya, *spherodized stainless steel* adalah salah satu jenis *stainless steel* yang memiliki fasa presipitasi metal karbida ($M_{23}C_6$) berbentuk bulat (*spheroid*). Fasa ini diperoleh setelah *aging* yang cukup lama, Spheroidisasi karbida sangat penting untuk memberikan keuletan dan ketangguhan pada baja karbon tinggi seperti baja perkakas dan baja bantalan. Meskipun berbagai proses anil untuk tujuan ini diusulkan, proses dimana material yang diaustenitisasi mengalami transformasi eutektoid di bawah pendinginan super yang cukup rendah banyak digunakan. Siklus anil dapat dibagi menjadi dua proses, yaitu austenitisasi dan pendinginan. Honda dan Saitoh) menyarankan bahwa distribusi atom karbon yang tidak homogen dalam austenit diperlukan saat baja di-austenitisasi, dan atom karbon yang terkonsentrasi secara lokal dalam austenit dapat diasumsikan mendukung nukleasi karbida pada reaksi eutektoid berikutnya, menghasilkan struktur karbida bulat (Nakano et al., 1976).

Penelitian (Hu, 2012) mengungkapkan bahwa terjadi evolusi pada baja ferritik (2-13% crom) yang mengalami creep (550°C selama 165.000 jam) mengakibatkan butir karbida ($M_{23}C_6$) mengalami speroidisasi. Lamanya waktu pemanasan menyebabkan presipitasi pada karbida dapat mencapai fase dimana karbida terdistribusi secara homogen dan sebagian membesar melalui penggabungan dengan presipitat karbida lainnya.

Dari beberapa penelitian di atas dapat dipelajari bahwa presipitasi $M_{23}C_6$ pada batas butir terjadi jika *stainless steel* mengalami pemanasan biasa. Tetapi jika mengalami pemanasan berkepanjangan maka presipitat $M_{23}C_6$ akan meninggalkan batas butir dan bergerak masuk ke dalam badan butir yang selanjutnya akan membentuk fasa speroid $M_{23}C_6$. penulis menduga dengan partikel karbida yang tersebar secara merata dalam matriks, secara umum dapat mengurangi kecenderungan sensitisasi dibandingkan dengan struktur mikro yang memiliki pengendapan karbida yang lebih besar di sepanjang batas butir. Alasannya, pada struktur speroid, karbida tersebar lebih merata di dalam butir, sehingga mengurangi jumlah krom yang bermigrasi ke batas butir untuk membentuk karbida $Cr_{23}C_6$. Partikel karbida yang lebih kecil dan tersebar merata cenderung lebih stabil dan kurang mudah tumbuh dibandingkan dengan karbida yang besar dan terkonsentrasi di batas butir. Berdasarkan literatur tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian tentang **“STUDI EKSPERIMENTAL KETAHANAN KOROSI DAN FENOMENA SENSITISASI STAINLESS STEEL 304 YANG MENGALAMI LOW AGING TEMPERATURE”**.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh *low aging temperatur* terhadap fenomena sensitisasi yang terjadi pada material *stainless steel 304*?
- Seberapa besar pengaruh *low aging temperatur* terhadap potensial korosi material *stainless steel 304*?
- Bagaimana karakteristik dari material setelah pemberian *low aging temperatur*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Menganalisis pengaruh dari pemberian *low aging temperatur* pada material *stainless steel* 304 terhadap fenomena sensitisasi material.
- b. Menganalisis nilai potensial korosi material SS 304 setelah *perlakuan low aging temperatur*.
- c. Menganalisis fasa yang terbentuk pada SS 304 setelah penerapan *low aging temperature*

1.4 Batasan masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Tungku pemanas menggunakan temperatur atmosfer
- b. Menggunakan larutan HCl dalam pengujian Potensiodinamik
- c. Menggunakan material pelat SS 304.
- d. Suhu lingkungan dianggap sama

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Menambah Bagi penulis, sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Magister Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
- b. Bagi pembaca, dapat mengetahui pengaruh *low aging temperatur* pada material *stainless steel* 304 terhadap fenomena sensitisasi.
- c. Bagi universitas, dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya

1.6 Austenitic Stainless steel

Baja tahan karat telah banyak digunakan dalam konstruksi dan pemeliharaan minyak dan gas karena ketahanan korosinya yang lebih baik dibandingkan baja karbon. Baja tahan karat mendapatkan ketahanan korosi yang lebih tinggi dari lapisan oksida pasif di permukaannya (Javidi et al., 2020). Baja tahan karat austenitik adalah bahan konstruksi yang paling disukai untuk berbagai komponen yang diperlukan dalam industri kimia, petrokimia, pupuk, dan nuklir. Pemilihan baja ini pada dasarnya dilakukan karena kombinasi yang baik antara sifat mekanik, fabrikasi, dan ketahanan terhadap korosi (Parvathavarthini & Dayal, 2002).

Baja tahan karat austenitik umumnya digunakan untuk membuat bejana tekan, yang merupakan komponen penting dari pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan peralatan kimia, karena kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan terhadap korosi yang sangat baik, dan kemampuan lasnya. Selama proses servis komponen-komponen tersebut di atas, tidak dapat dihindari bahwa sambungan las baja tahan karat austenitik akan terkena lingkungan korosif, yang kemungkinan besar akan mengakibatkan retak korosi tegangan (SCC) yang parah pada zona yang terpengaruh panas (HAZ) pada sambungan las (Dai et al., 2022).

Baja tahan karat austenitik memiliki kemampuan ketahanan korosi yang tinggi karena kandungan kromium (Cr) yang tinggi dan juga penambahan nikel (Ni) dalam paduannya. Karena keunggulan ini, misalnya, foil baja tahan karat konduktor telah

digunakan sebagai pengumpul arus dalam penelitian perangkat elektrokimia atau energi berbasis bahan nano (Rashid et al., 2012).

1.6.1 *Stainless steel 304*

SS 304 merupakan paduan yang paling banyak digunakan, memiliki stabilitas mikrostruktural yang lebih besar dan ketahanan korosi yang lebih baik daripada AISI 301, komposisi paling ramping dalam kelompok ini di mana austenit dengan mudah berubah menjadi martensit selama deformasi plastis (Ummah, 2019).

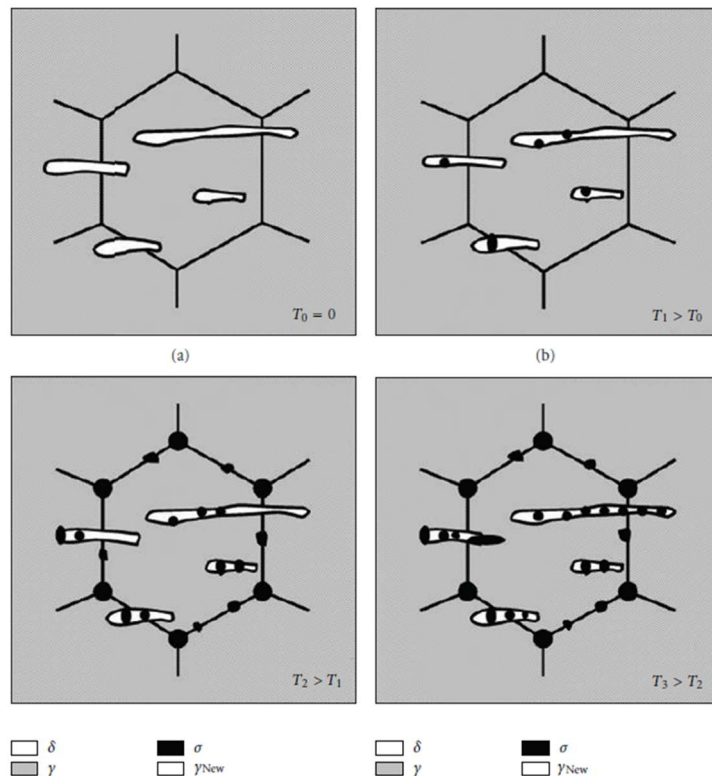
Baja tahan karat austenitik tipe 304 (304 ASS) banyak digunakan sebagai bahan struktural karena sifat mekaniknya yang kuat dan tahan korosi (Bai et al., 2024). Namun demikian, baja ini rentan terhadap sensitisasi ketika mengalami pemanasan pada kisaran suhu 450-850 C. Pada fenomena ini, biasanya terjadi presipitasi $(Fe,Cr)_{23}C_6$ pada batas butir dan selanjutnya terjadi penipisan kromium yang berdekatan dengan endapan. Dalam kondisi sensitisasi, baja rentan terkena korosi batas butir dan korosi retak tegangan dalam lingkungan asam yang mengakibatkan kegagalan pada komponen yang dibuat (Parvathavarthini & Dayal, 2002).

Table 1. Komposisi material

Material	Element composition (%)								
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
<i>Stainless steel 304</i>	71.0	0.154	0.406	1.31	18.6	0.0010	7.71	0.0005	0.0200

1.7 Dekomposisi pada *austenitic stainless steel*

Austenitic stainless steel pada kondisi awal umumnya didominasi oleh fasa austenit (γ) dengan struktur kristal FCC (Face Centered Cubic) yang stabil pada suhu kamar akibat kandungan Ni yang tinggi. Namun, selama proses solidifikasi, deformasi panas, pengelasan, maupun aging pada suhu menengah hingga tinggi, berbagai fasa sekunder dapat terbentuk dan memengaruhi sifat mekanik serta ketahanan korosi material.



Gambar 1. Proses dekomposisi austenit *stainless steel* seiring durasi pemanasan
Sumber: (Huh & Kim, 2022)

1.7.1. Fasa Austenit (γ)

Fasa γ merupakan fasa matriks utama pada *austenitic stainless steel*. Fasa ini memiliki keuletan tinggi, ketangguhan yang baik, serta ketahanan korosi yang unggul. Dalam baja seperti AISI 316L, austenit tetap stabil setelah *solution annealing*, tetapi masih dapat mengandung sisa δ -ferrite akibat proses solidifikasi (Villanueva et al., 2006).

1.7.2. Fasa Delta Ferrite (δ)

Meskipun tergolong *austenitic*, baja seperti AISI 316L dapat mengandung δ -ferrite dalam jumlah kecil ($<1\%$), terutama pada kondisi *as-cast* atau setelah proses termomekanik tertentu. δ -ferrite bersifat BCC dan kaya unsur pembentuk fasa intermetalik seperti Cr, Mo, dan Si, sehingga berperan penting sebagai lokasi awal presipitasi fasa sigma (Villanueva et al., 2006). Villanueva et al. menunjukkan bahwa presipitasi fasa sigma pada *austenitic stainless steel* paling sering dimulai di dalam pulau δ -ferrite, karena difusivitas unsur substitusional di ferrite jauh lebih cepat dibandingkan di austenite.

1.7.3. Fasa Sigma (σ)

Fasa sigma (σ) merupakan fasa intermetalik kaya Cr dan Mo dengan struktur kristal tetragonal, yang sangat keras dan getas. Menurut Hsieh dan Wu, σ -phase

umumnya terbentuk pada rentang suhu 600–1000 °C, dengan laju presipitasi maksimum sekitar 800–850 °C (Hsieh & Wu, 2012).

Pada *austenitic stainless steel*, fasa sigma dapat terbentuk melalui beberapa mekanisme:

1. Transformasi eutektodik $\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$, yang merupakan mekanisme paling dominan bila δ -ferrite hadir.
2. Presipitasi di batas butir austenit, terutama pada *triple junction* setelah waktu aging yang lama.
3. Presipitasi langsung dari austenite, namun proses ini sangat lambat dan biasanya memerlukan ribuan jam aging.

Secara kimia, fasa sigma lebih kaya Cr, Mo, dan Si serta lebih miskin Fe dan Ni dibandingkan matriks austenit. Hal ini menyebabkan terbentuknya zona miskin kromium (Cr-depleted zone) di sekitarnya, yang berdampak langsung pada penurunan ketahanan korosi (Villanueva et al., 2006).

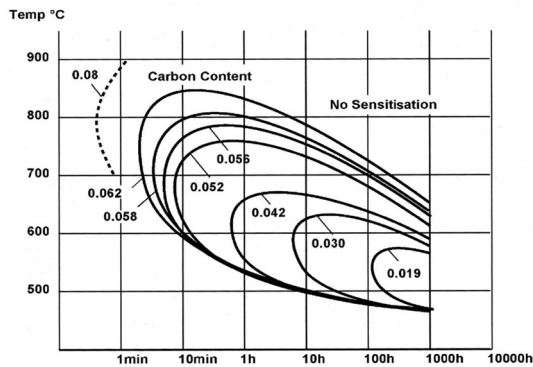
1.7.4. Fasa Austenit Sekunder (γ_2)

Selama transformasi eutektodik $\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$, terbentuk austenit sekunder (γ_2) yang memiliki komposisi berbeda dari austenit primer. Austenit sekunder ini umumnya lebih miskin Cr dan Mo, sehingga sifat ketahanan korosinya lebih rendah dibandingkan austenit awal (Hsieh & Wu, 2012).

1.8 Sensitisasi

Kisaran suhu sensitisasi sering dijumpai selama perlakuan panas isothermal pada komponen fabrikasi untuk tujuan menghilangkan stres, servis yang berkepanjangan pada suhu tinggi, pendinginan lambat dari suhu yang lebih tinggi (misalnya anil larutan atau selama penghentian operasi pabrik pada suhu yang lebih tinggi), perlakuan panas yang tidak tepat pada zona yang terkena dampak panas (HAZ) pada lasan atau pengerjaan panas pada material (Parvathavarthini & Dayal, 2002).

Ketahanan korosi baja tahan karat austenitik mengalami penurunan akibat sensitisasi klasik ketika menghadapi suhu berkisar antara 550 hingga 800°C yang mengakibatkan pengendapan karbida kromium di sepanjang batas butir dengan penipisan Cr secara simultan dari dekat batas butir. Temuan lain menunjukkan bahwa, masukan panas yang tepat melalui proses perlakuan panas dapat membawa efek menguntungkan pada struktur mikro yang kemudian secara langsung meningkatkan ketahanan korosi pada material (Rashid et al., 2012).

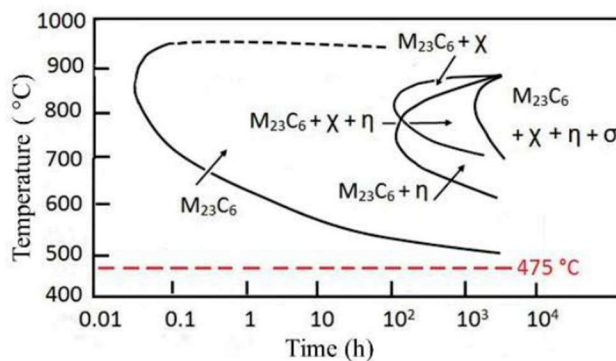


Gambar 2. Laju Presipitasi Cr₂₃C₆ sebagai fungsi kadar karbon
 Sumber : (Grades, n.d.)

Sensitisasi rentan terjadi ketika terjadi pemanasan pada kisaran suhu 450-850 C. Pada fenomena ini, biasanya terjadi presipitasi (Fe,Cr)₂₃C₆ pada batas butir dan selanjutnya terjadi penipisan kromium yang berdekatan dengan endapan. Dalam kondisi sensitisasi, baja rentan terkena korosi batas butir dan korosi retak tegangan dalam lingkungan asam yang mengakibatkan kegagalan pada komponen yang dibuat (Parvathavarthini & Dayal, 2002).

1.9 Heat Treatment

Proses perlakuan panas menjadi pusat perhatian karena efeknya yang menjanjikan pada sifat material logam. Di antara berbagai faktor metalurgi yang mempengaruhi sifat logam, seperti pemulihan, rekristalisasi, dan penghalusan butir, difusi atom adalah salah satu yang paling penting yang mempengaruhi karakteristik material dan perlu diteliti lebih lanjut di berbagai bidang studi material. Ada banyak penelitian yang tersedia dalam literatur yang berkaitan dengan karakteristik difusi dalam beberapa dekade terakhir, sehingga menekankan pentingnya difusi. Dalam penelitian ini, perlakuan panas pada komposit matriks logam-logam dengan dua atau lebih dari satu logam yang berbeda mendapatkan perhatian yang luar biasa (Yousefi Mehr & Toroghinejad, 2022).

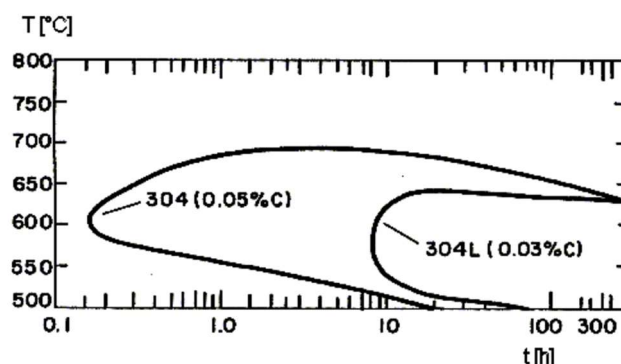


Gambar 3. TTT diagram *austenitic stainless steels*
 Sumber : (Montanari et al., 2022)

Tujuan utama dari perlakuan panas larutan adalah pelarutan fase yang diendapkan selama pemrosesan termomekanis material, seperti, misalnya, kasus $M_{23}C_6$. Perlakuan panas ini dapat menghilangkan fase endapan yang muncul karena siklus termal pengelasan yang menjadi sasaran sambungan las, memulihkan properti mekanis. Sebagian besar endapan yang terbentuk selama pemadatan dilarutkan, mempertahankan elemen paduan dalam larutan padat dalam matriks austenitik. Perlakuan panas larutan harus dilakukan setidaknya 900°C , karena pengendapan karbida $M_{23}C_6$ dapat terjadi antara 450°C dan 900°C , selama 1-10 jam, tetapi direkomendasikan antara 1035°C dan 1120°C , diikuti dengan pendinginan cepat, perlakuan yang dilakukan pada sambungan las yang seharusnya bekerja pada suhu antara 400°C dan 900°C (Gonzaga et al., 2020).

1.10 Aging Treatment

Para penulis baru-baru ini telah menyelesaikan pemeriksaan menyeluruh terhadap stabilitas struktur mikro las baja tahan karat austenitik selama penuaan pada suhu 550°C ke atas. Ditemukan bahwa selama penuaan suhu “tinggi” seperti itu, ferit berubah menjadi fase sigma sementara karbida $M_{23}C_6$ yang kaya kromium terbentuk di sepanjang antarmuka feritaustenit asli. Ketidakstabilan mikrostruktural ini menyebabkan degradasi sifat mekanik (Vitek et al., 1991).



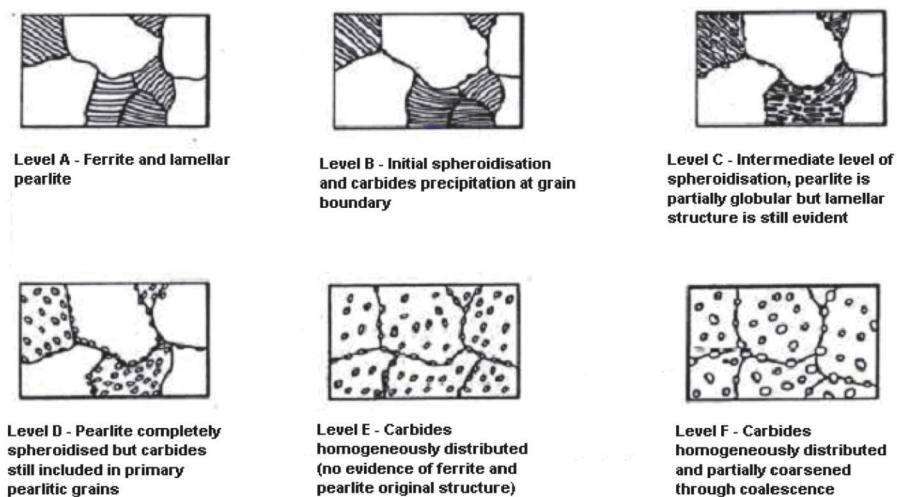
Gambar 4. Kurva TTT (Time-TemperatureTransformation) baja tahan karat AISI 304 untuk dua kandungan karbon yang berbeda. Semakin rendah kandungan karbon, semakin tinggi waktu inkubasi karbida $M_{23}C_6$

Sumber : (Iacoviello & Iacoviello, 2004)

Pada *cast stainless steel* yang memiliki fasa ferit sebagai konstituen minor. Perhatian khusus diberikan pada komponen baja tahan karat tuang pada sistem pembangkit listrik. Telah ditemukan bahwa dekomposisi spinodal ferit yang sama terjadi selama *low temperatur aging*. Selain itu, reaksi pengendapan terjadi selama penuaan suhu rendah. Karbida $M_{23}C_6$ yang kaya kromium terbentuk pada batas austenitferrit dengan cara yang hampir sama seperti pada suhu yang lebih tinggi sementara endapan lain, yang dikenal sebagai fase-G, telah ditemukan terbentuk di dalam ferit, biasanya di sepanjang dislokasi dalam ferit. Meskipun ferit adalah konstituen minor, penuaan suhu rendah dan dekomposisi ferit yang dihasilkan melemahkan paduan cor secara keseluruhan. (Vitek et al., 1991).

Aging treatment dilakukan pada suhu rendah (low temperature) dilakukan untuk memicu terjadinya pengendapan yang membentuk $M_{23}C_6$ hingga karbida memasuki tahap sferoid. Sama seperti temuan pada penelitian sebelumnya dikatakan telah diketahui bahwa temperatur layanan yang lebih tinggi (600-650°C) mempercepat semua proses degradasi pada baja, seperti migrasi atom dan dislokasi, pemulihan dan rekristalisasi, pengerasan butiran dan sub-butiran, serta pengerasan endapan dan martensit. Dengan bertambahnya waktu penahanan, elemen paduan substitusi, seperti Cr, Mo, V dan Mn, menggantikan Fe dalam karbida $M_{23}C_6$. Karena perubahan komposisi kimia dan pertumbuhan partikel karbida ini secara langsung berkaitan dengan difusivitas elemen paduan dan *self diffusion* besi, yang semuanya sangat bergantung pada suhu (Godec & Balantič, 2016).

Penelitian lain juga mengungkapkan bahwa pada terjadi evolusi pada baja ferritik yang mengakibatkan butir karbida ($M_{23}C_6$) mengalami sferoidisasi, pada penelitian tentang creep, terdapat temuan yang menampilkan bahwa presipitasi pada karbida dapat mencapai fase dimana karbida terdistribusi secara homogen dan sebagian dikeraskan melalui penggabungan (Hu, 2012). Kemungkinan perubahan fasa dapat terjadi selama *aging* berlangsung.



Gambar 5. Klasifikasi ISPEL untuk evolusi struktur mikro baja ferritik

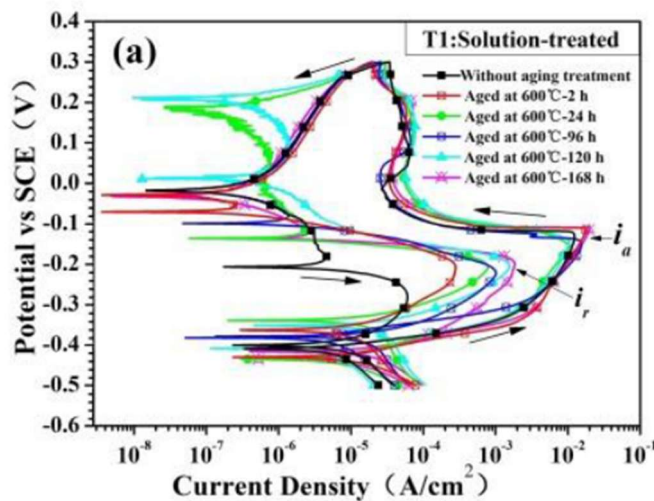
Sumber : (Hu, 2012)

1.11. Electrochemical Potentiokinetic Reactivation (EPR)

Reaktivasi Potensiokinetik Elektrokimia (EPR) adalah teknik untuk mengkarakterisasi sensitisasi paduan baja tahan karat secara kuantitatif. Meskipun pada awalnya dikembangkan untuk baja tahan karat 304, uji EPR juga telah berhasil digunakan untuk mengkarakterisasi sensitisasi sampel baja tahan karat 316L (Bowden et al., 2023).

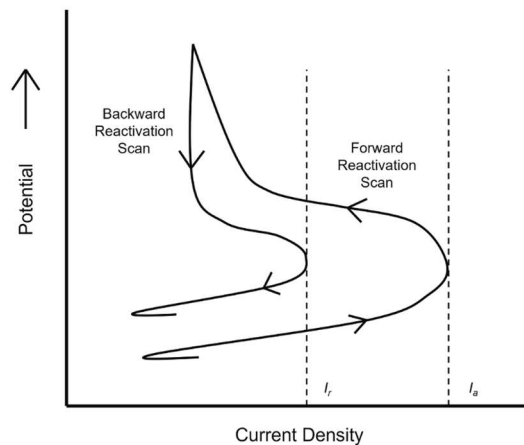
Menurut literatur, asal mula puncak arus reaktivasi kedua (I_{r2}) pada uji DL-EPR dikaitkan dengan pembubaran martensit selama pemindaian reaktivasi. Fenomena ini disebut sebagai “sensitisasi yang diinduksi martensit” karena sejumlah besar endapan kromium karbida dalam martensit saat pemanasan di atas 500 °C. Namun, penipisan Cr yang dikembangkan dalam martensit akan terisi kembali dengan cepat oleh difusi cepat

kromium dalam martensit selama penuaan. Oleh karena itu, sensitisasi akibat presipitasi karbida pada batas butir austenit menghasilkan profil penipisan Cr yang dalam dan serangan dimulai lebih awal pada potensial yang lebih mulia ($ER1 = 150 \text{ mVSCE}$) selama pemindaian reaktivasi pada uji DL-EPR, sedangkan pada martensit, terdapat profil penipisan Cr yang dangkal dan membutuhkan potensial yang lebih aktif ($ER2 = -250 \text{ mVSCE}$) untuk memulai serangan. Oleh karena itu, Ir_1 dan Ir_2 tidak terjadi pada potensial yang sama, yang disebabkan oleh tingkat penipisan Cr yang berbeda pada fase yang berbeda dalam super304H SS (Wang et al., 2016).



Gambar 6. Kurva DL-EPR dari spesimen T1 yang berumur 600 °C
Sumber : (Wang et al., 2016)

Pada penelitian (Wang et al., 2016) menampilkan kurva DL-EPR dari spesimen yang berbeda (T1, T2 dan T3) yang berusia 600, 650 dan 700 °C untuk berbagai waktu, kurva DL-EPR yang khas terlihat dengan puncak arus aktivasi (i_a) dan arus reaktivasi (i_r) yang signifikan dari spesimen T1 yang berusia 600, 650 dan 700 °C. Puncak arus reaktivasi pada kurva DL-EPR menunjukkan penipisan Cr pada batas butir akibat presipitasi karbida $M_{23}C_6$. Selain itu, nilai I_r meningkat secara bertahap menjadi 0,0025, 0,0150 dan 0,0038 mA/cm² untuk penuaan yang berkepanjangan selama 168 jam pada 600 dan 650 °C, dan 8 jam pada 700 °C, yang disebabkan oleh penyebaran zona penipisan Cr selama penuaan termal.



Gambar 7. Diagram skematik yang menunjukkan output dari tes EPR loop ganda.
Sumber : (Bowden et al., 2023)

1.12. *Hardness test*

Pengujian kekerasan telah banyak diteliti dalam ilmu material karena perannya yang penting dalam mengkarakterisasi sifat mekanik dan memprediksi kinerja material. Literatur yang ada memberikan wawasan mendalam tentang metode tradisional seperti Brinell, Rockwell, dan Vickers, serta teknik-teknik baru seperti pengujian kekerasan mikro dan nanoindentasi. Bagian ini meninjau kontribusi signifikan dalam bidang ini, dengan fokus pada kemajuan kunci, aplikasi, dan perbandingan antara berbagai metode pengujian (Gujar, 2025).

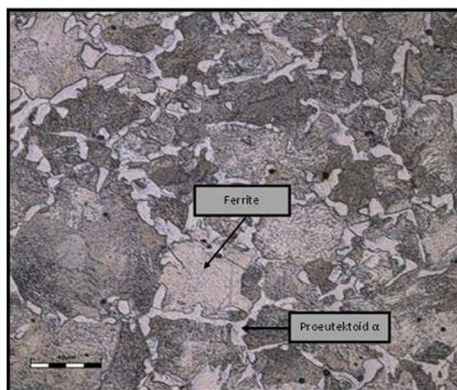
Metode tidak langsung untuk menilai sifat mekanik semakin menarik perhatian, dengan analisis kekerasan menjadi teknik yang paling sering digunakan. Kekerasan (HV), yang didefinisikan sebagai ukuran resistansi material terhadap deformasi plastik lokal, dapat ditentukan relatif cepat dan murah, dan pengukurannya seringkali non-destruktif atau minim invasif. Yang penting, banyak studi menunjukkan korelasi antara kekerasan dan kekuatan tarik, yang membuka potensi untuk menggunakan kekerasan sebagai predictor kekuatan bahan logam (Karolewska et al., 2025).



Gambar 8. Pengujian Microhardness Vickers.
Sumber : (Lab. Metalurgi fisik)

1.13. *Microstructure*

Metalografi adalah studi fisik dan komponen logam yang menggunakan mikroskop atau mengetahui perkiraan sifat-sifat fisik dengan mengenali ciri-ciri khusus dari struktur mikronya ataupun sebagai karakteristik bahan. Contoh foto struktur mikro AISI 1030 sebagaimana pada Gambar 2.13 berikut.

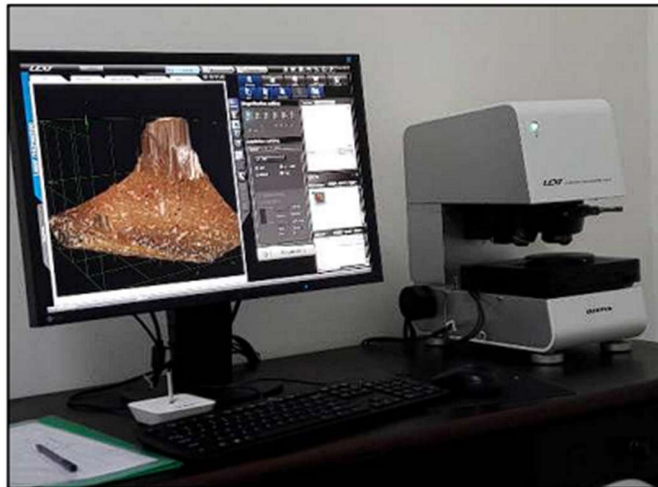


Gambar 9. Struktur mikro AISI 1030
Sumber: (Nurul Ichsan, 2020)

Henry Clifton Sorby ilmuwan abad 19 merintis produksi besi dan baja modern di Sheffield (UK) menyatakan bahwa terdapat hubungan erat antara struktur mikro dan sifat makroskopik, dan menjelang akhir hayatnya mengatakan, “jika terjadi kecelakaan kereta api, maka perusahaan harus mengambil rel kereta api untuk diperiksa dengan mikroskop dan saya dianggap sebagai orang sehat yang dikirim ke rumah sakit jiwa, tetapi itu adalah apa yang sekarang sedang dilakukan”.

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop logam sebagaimana pada Gambar 2.14. mikroskop optik untuk logam dengan posisi spesimen menghadap

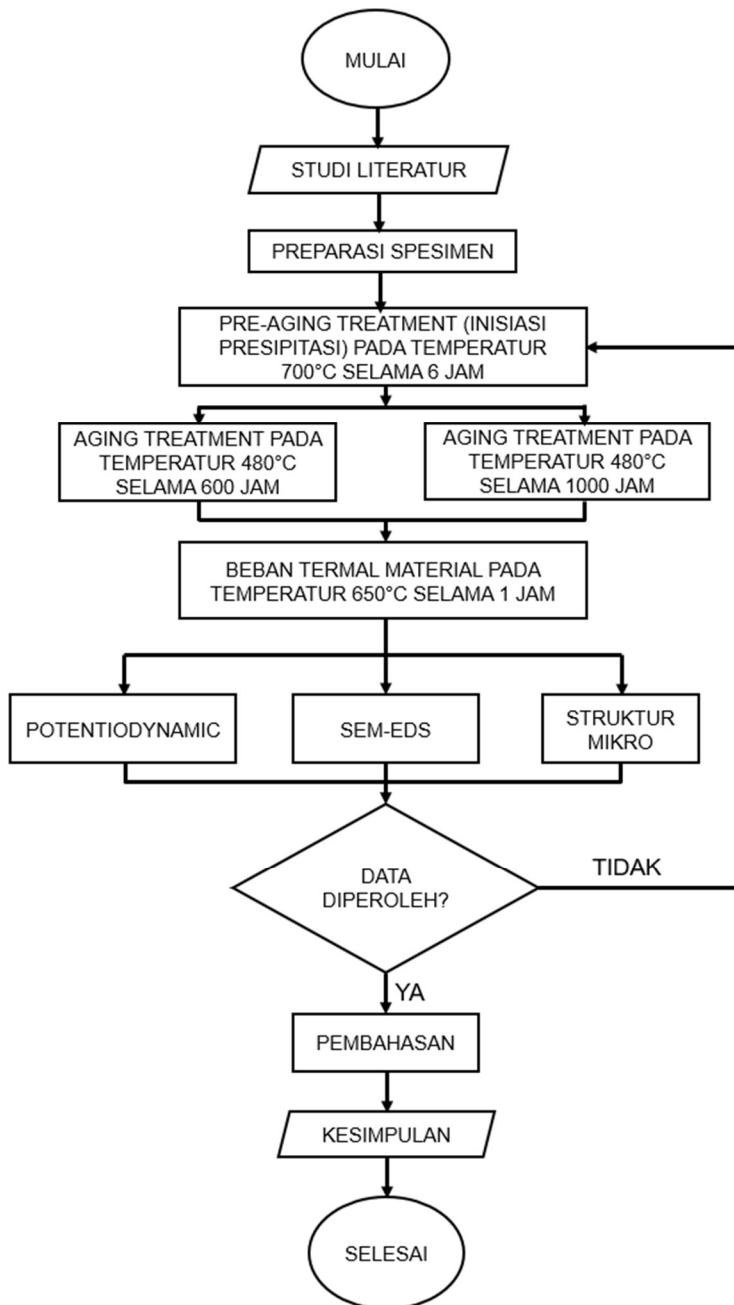
ke atas (normal) dan posisi spesimen menghadap kebawah (inverted). Bedanya dengan mikroskop biologi/kedokteran adalah pada penerangan dilakukan dari atas spesimen, karena spesimen logam tidak transparan (translucent), sehingga tidak mungkin diberi penerangan dari arah bawah (Syamsul Hadi, 2016).



Gambar 10. Mikroskop optik untuk logam
Sumber: (Lab Metalurgi Fisik UNHAS)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Flowchart Penelitian.



Gambar 11. Diagram Alir

2.2 Metodologi Penelitian

Untuk memperoleh data yang dibutuhkan dalam penyusunan tesis ini, maka pengumpulan data dimulai dengan mencari referensi dari berbagai jurnal dan literatur serta mempelajarinya, data data yang memuat tentang *austenitic stainless steel* serta fenomena yang terjadi setelah pemanasan dalam jangka waktu yang lama.

Tahap preparasi dilakukan setelah beberapa penelitian telah didapat, dengan patokan beberapa standar, spesimen dibentuk dengan ukuran 10 x 10 x 2 mm mengikuti standar dalam pengujian menggunakan alat corrttest.

Spesimen yang telah dipreparasi kemudian diberi *aging* pada temperatur 700°C selama 6 jam untuk memicu terjadinya fasa sensitisasi dan membentuk karbida Krom (Cr_{23}C_6) yang kemudian dilanjutkan *aging* pada temperatur 480°C selama 600 jam dan 1000 jam untuk menstabilkan karbida krom dan mendistribusikan secara merata.

Spesimen lainnya disiapkan dimana material tanpa perlakuan serta material yang telah diperlakukan *aging* diberi pembebanan termal (650°C selama 1 jam) untuk mengamati ketahanan material yang telah mengalami *aging* serta material yang tanpa adanya perlakuan terhadap suhu sensitisasi.

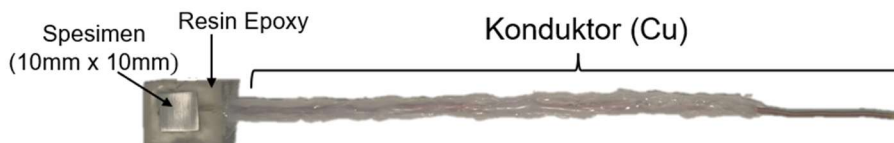
Spesimen kemudian diamati dengan menggunakan beberapa pengujian untuk melihat fasa serta ketahanannya terhadap korosi dan fenomena sensitisasi, digunakan uji potentiodynamik untuk mengamati ketahanan material terhadap korosi, SEM-EDS digunakan untuk mengamati fasa dan unsur-unsur yang terbentuk serta digunakan pengujian struktur mikro untuk mengamati speroidisasi dan ukuran butir yang terbentuk setelah pemberian *low aging* temperatur. Setelah data terkumpul kemudian data di bahas dan kemudian disimpulkan

2.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik, Fakultas Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin. Penelitian ini berlangsung selama 6 bulan dimulai dengan pembuatan proposal, preparasi spesimen, pelaksanaan penelitian dan penyelesaian laporan.

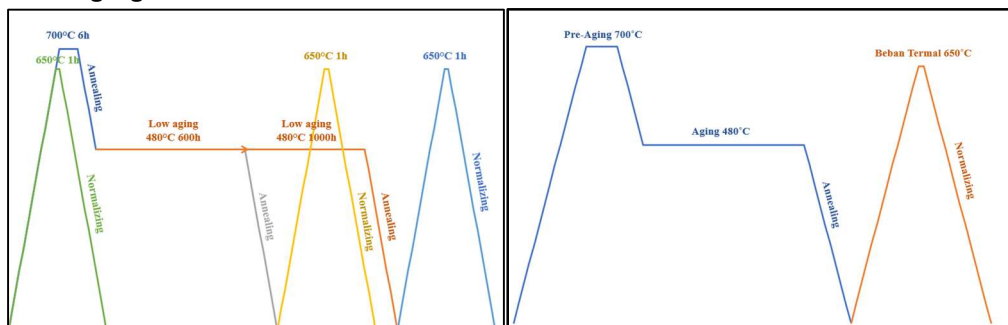
2.4 Preparasi spesimen

Spesimen merupakan pelat *stainless steel* 304 dengan ketebalan 2 mm di potong menggunakan plate cutting dengan ukuran 10 mm² mengikuti ukuran standar pengujian alat uji Corttest.



Gambar 12. Dimensi spesimen material *stainless steel* 304

2.5 Aging Treatment



Gambar 13. Proses pemanasan dan pendinginan aging dan beban termal material

Aging treatment dilakukan pada penelitian ini dengan tujuan untuk memicu terjadinya presipitasi karbida pada material hingga ke tahap dimana karbida yang terbentuk dapat stabil dan terdistribusi hingga ke badan butir. Pada penelitian ini digunakan 2 metode *aging*, menggunakan temperatur tinggi di 700°C selama 6 jam dan dilanjutkan di temperatur 480°C selama 1000 jam, dengan menggunakan temperatur konstan di 480°C selama 1000 jam. Hal itu dilakukan untuk dapat memicu material hingga ke fasa lebih stabil dan merata.

2.6. Pemberian Efek Sensitisasi pada material

Material yang telah tersensitisasi diperlukan sebagai pembanding untuk melihat pengaruh dari penuaan pada suhu rendah terhadap material. Material diberi pembebanan termal pada suhu 650°C selama 1 jam dengan pendinginan normalizing untuk memicu terjadinya fenomena sensitisasi pada baja tahan karat. Berdasarkan penelitian sebelumnya, sensitisasi pada baja tahan karat dapat terjadi pada rentang suhu 500-900°C (Tokuda et al., 2020) (Javidi et al., 2020).

2.7. Prosedur Penelitian

A. Pengujian Reaktivasi Potensiokinetik Elektrokimia (EPR)

1. Persiapan Spesimen Uji

- Potong spesimen sesuai ukuran (1 cm²).
- Solder kabel tembaga sebagai penghubung kabel WE dengan spesimen.
- Tutup bagian spesimen yang tidak diuji menggunakan resin/epoksi, sisakan luas permukaan (1 cm²).
- Amplas bertahap menggunakan kertas amplas (grit 400–1200 atau lebih halus).
- Poles hingga permukaan halus dan homogen.

2. Persiapan Larutan Elektrolit

- Siapkan larutan korosif sesuai standar penelitian (HCl 1M).
- Gunakan air suling/deionisasi.
- Pastikan volume larutan cukup untuk menenggelamkan seluruh permukaan uji.
- Kontrol temperatur larutan (25 ± 2 °C).

3. Konfigurasi Sel Elektrokimia

- Pasang tiga elektroda pada sel uji:
 - Working Electrode (WE): spesimen uji.
 - Reference Electrode (RE): Ag/AgCl.
 - Counter Electrode (CE): platinum
- Pastikan posisi elektroda tidak saling bersentuhan.
- Hubungkan masing-masing elektroda ke terminal Corrtest:

4. Pengukuran Open Circuit Potential (OCP)

- Jalankan software Corrtest.
- Lakukan pengukuran OCP selama 10–30 menit.
- Pastikan potensial stabil sebelum melanjutkan uji potentiodynamic.

5. Pelaksanaan Uji Potentiodynamic Polarization

- Atur parameter pengujian pada software Corrtest:
 - Rentang potensial: -250 mV hingga $+250\text{ mV}$ terhadap OCP
 - Laju pemindaian (scan rate): 10 mV/s
- Pilih mode potentiodynamic polarization.
- Mulai pengujian dan biarkan sistem merekam kurva potensial (E) vs log arus (log I).
- Hentikan pengujian setelah batas potensial tercapai.

6. Analisis Data

- Peroleh kurva Tafel dari hasil pengujian.
- Tentukan parameter korosi dengan fitting
 - Potensial korosi (E_{corr})
 - Arus korosi (I_{corr})
 - Laju korosi (corrosion rate)
- Analisis perbandingan antar spesimen atau kondisi lingkungan.

B. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dipakai untuk menganalisis karakter fasa yang terbentuk dan karbida yang terbentuk setelah penuaan pada material baja tahan karat 304 sebagai validasi dan data pendukung. Pengujian mikrostruktur menggunakan alat uji JCM-6000 plus.

2.8 Rencana Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Bulan / Tahun						
		Nov 2025	Des 2025	Jan 2026	Feb 2026	Mar 2026	Apr 2026	Mei 2026
1	Studi Pustaka							
2	Penyusunan Proposal							
3	Seminar Proposal							
4	Persiapan Alat& Bahan							
5	Penelitian							
6	Penyusunan Tesis							
7	Seminar Hasil							
8	Ujian Tutup							