

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditampilkan serta penjelasan bagaimana hasil dari penelitian dan pembahasan dari data yang didapatkan:

4.1 Hasil Pengujian

4.1.1 Pengujian Kekerasan

Pada sampel *stainless steel 304 thin foil* setelah diberikan perlakuan panas dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur dan *holding time* terhadap nilai kekerasan pada sampel. Uji kekerasan yang dilakukan menggunakan *Vickers hardness* untuk setiap sampel dilakukan sebanyak 3 kali identasi dimana hasil pengukuran dari diameter identasi diambil nilai rata-ratanya lalu dihitung berdasarkan ASTM E384. Berikut data hasil percobaan kekerasan yang ditampilkan pada tabel.

Tabel 4.1 Data Hasil Uji Kekerasan

Kode sampel	Nilai Kekerasan (HV)
NT	400
Quenching	384
T 250 - H 60	340
T 250 - H 90	307
T 250 - H 120	303
T 400 - H 60	310
T 400 - H 90	301
T 400 - H 120	293
T 550 - H 60	275
T 550 - H 90	246
T 550 - H 120	243

4.1.2 Hasil Uji Korosi

Pada sampel *stainless steel 304 thin foil* dilakukan pengujian korosi untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan terhadap laju korosi masing-masing sampel. Uji korosi menggunakan metode *immersion test* dimana sampel direndam dalam larutan H₂SO₄ dengan konsentrasi 0,01 M selama 30 hari perendaman. Lalu ditimbang selisih berat sampel awal dengan akhir untuk mendapatkan kehilangan massa pada masing-masing sampel untuk dimasukkan kedalam rumus perhitungan laju korosi metode *weight loss*. Berikut data hasil percobaan korosi yang ditampilkan pada tabel berikut.

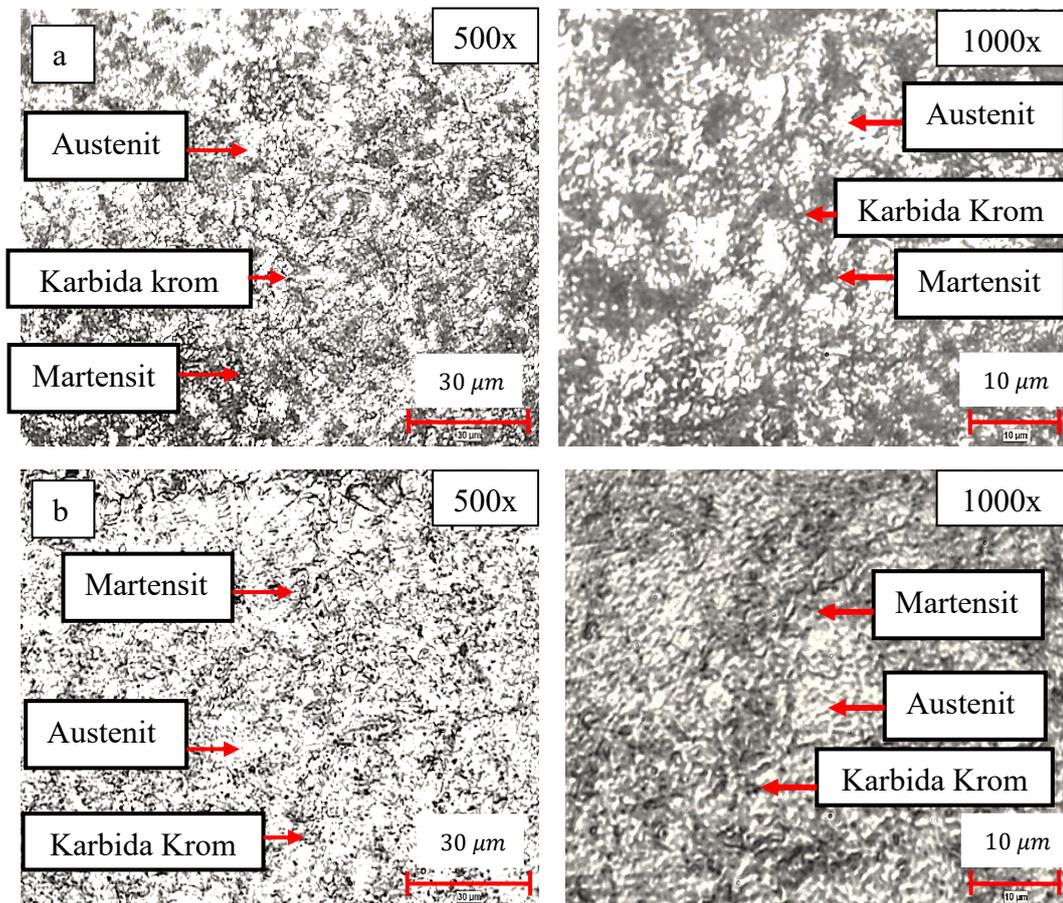
Tabel 4.2 Data Hasil Uji Korosi

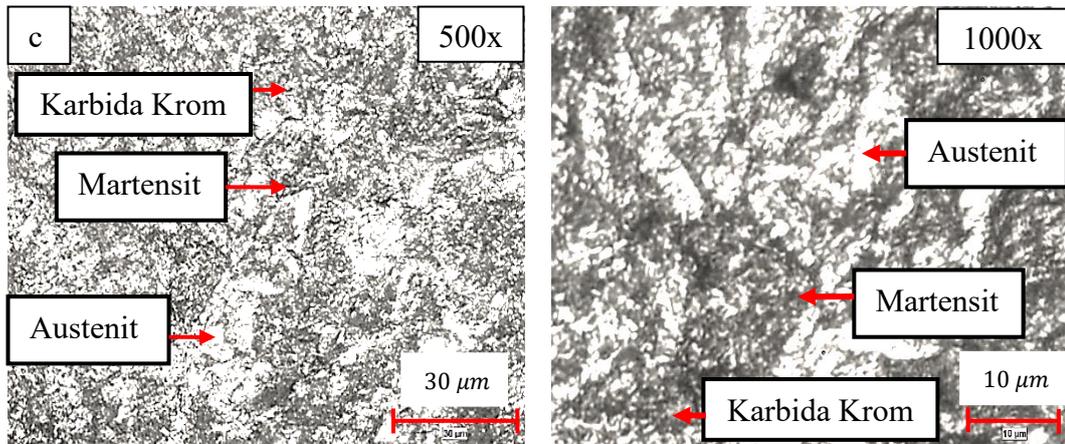
Spesimen	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Kehilangan Massa (gram)	Laju Korosi (mm/y)
NT	0,2523	0,2519	0,0003	9 x 10 ⁻⁴
T 250 - H 60	0,2521	0,2519	0,0002	6 x 10 ⁻⁴
T 250 - H 90	0,2513	0,2506	0,0007	21 x 10 ⁻⁴
T 250 - H 120	0,2523	0,2513	0,0010	31 x 10 ⁻⁴
T 400 - H 60	0,2526	0,2517	0,0009	27 x 10 ⁻⁴
T 400 - H 90	0,2514	0,2499	0,0015	45 x 10 ⁻⁴
T 400 - H 120	0,2518	0,2495	0,0023	68 x 10 ⁻⁴
T 550 - H 60	0,2521	0,2490	0,0031	92 x 10 ⁻⁴
T 550 - H 90	0,2523	0,2485	0,0038	113 x 10 ⁻⁴
T 550 - H 120	0,2525	0,2481	0,0044	131 x 10 ⁻⁴

4.1.3 Hasil Pengamatan Metalografi

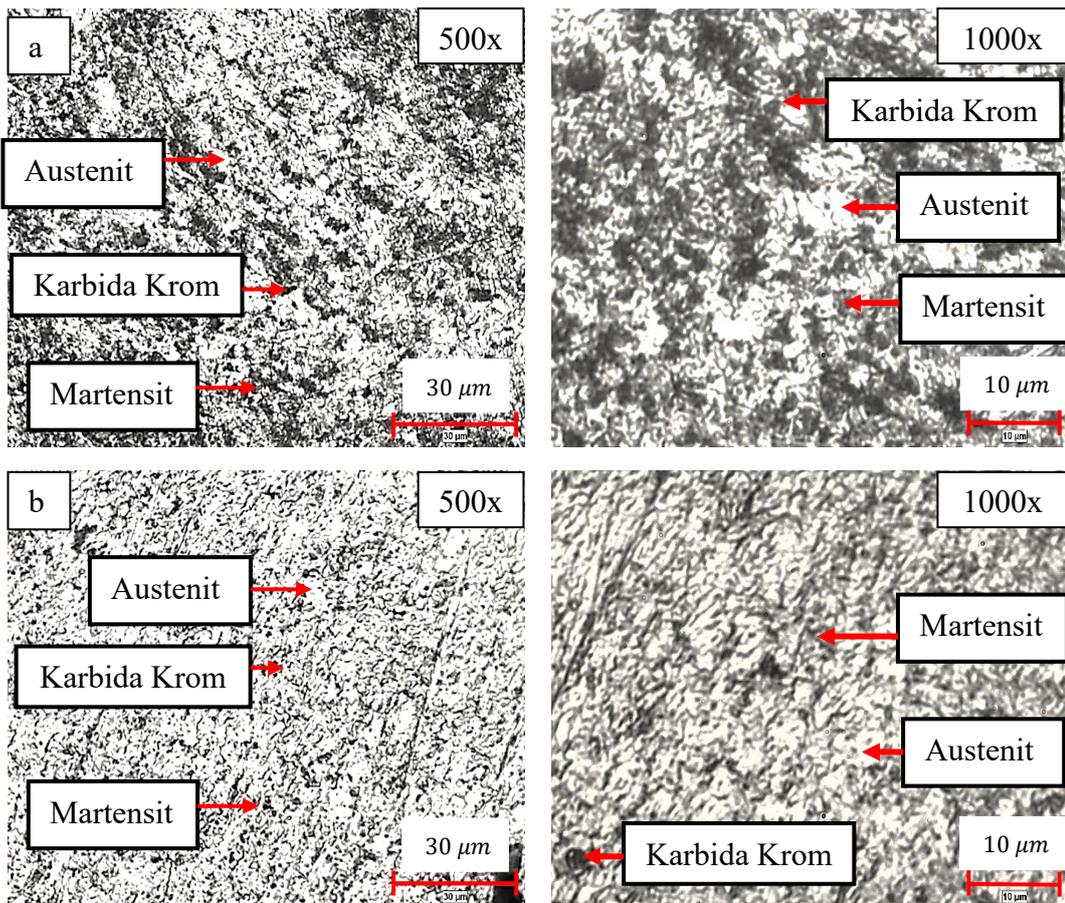
Spesimen *stainless steel 304* setelah diberikan perlakuan panas *tempering* dilakukan uji metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang

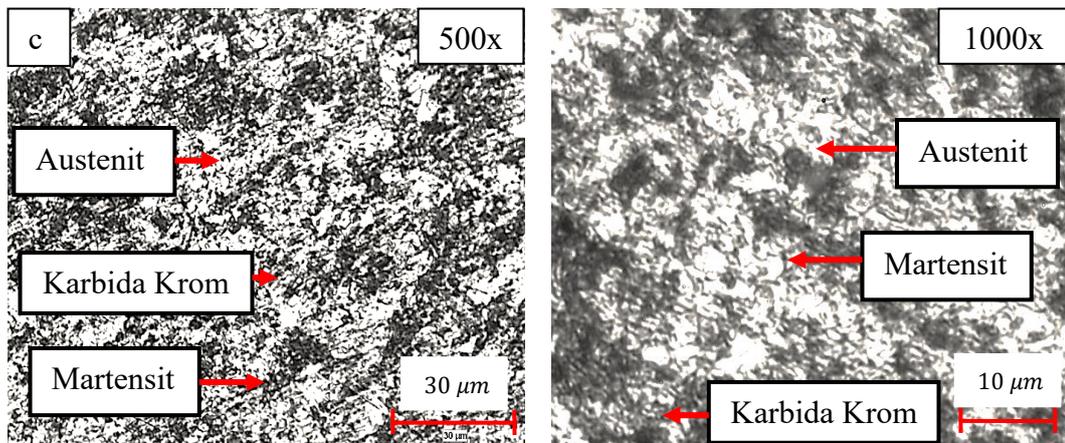
terbentuk. Spesimen dilakukan etsa 33,3% HNO₃ + 33,3% HCl + 33,3% *glycerol*. Spesimen yang dilakukan metalografi telah dilakukan perlakuan panas *quenching* pada temperatur 900°C dalam waktu 1 jam. Setelah itu dilanjutkan proses *tempering* dengan variasi temperatur 250°C, 400°C dan 550°C masing – masing waktu tahan 60, 90, dan 120 menit. Setelah dilakukan etsa analisis yang diambil yaitu melihat morfologi butir dan besar ukuran butir, berikut hasil yang didapat dengan perbesaran 500x dan 1000x.



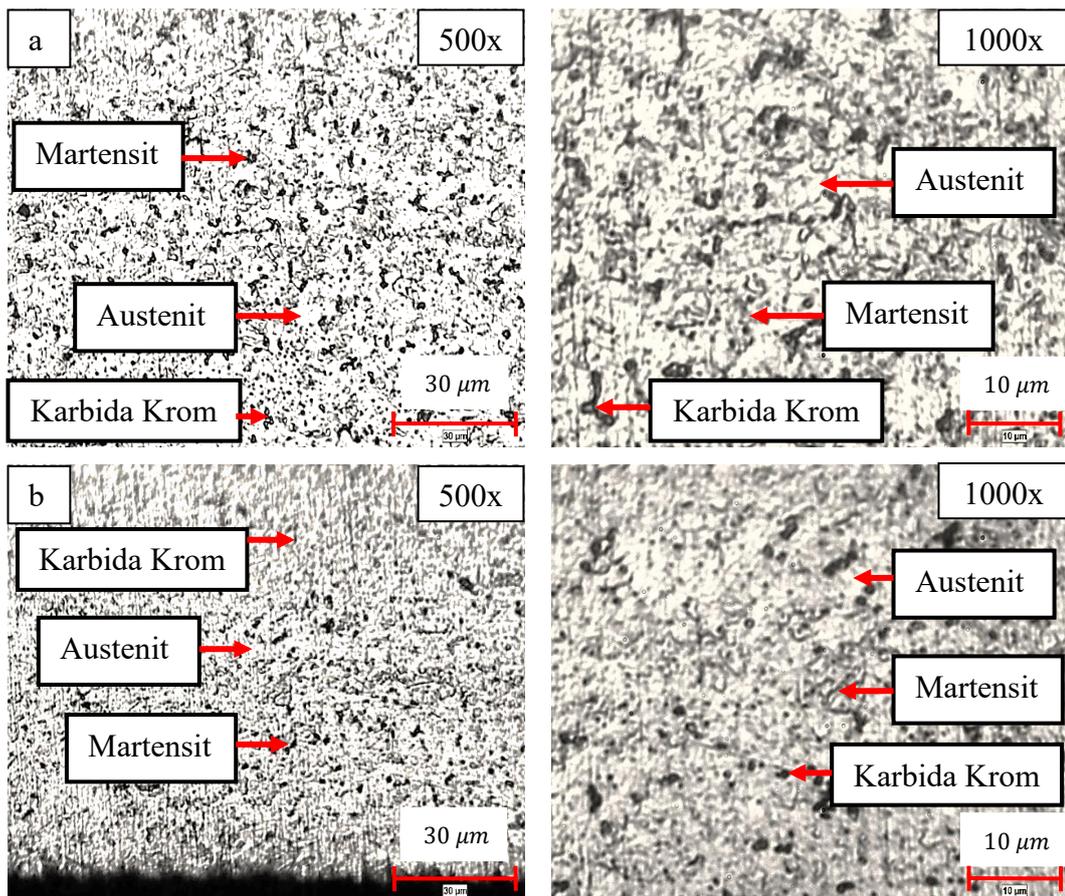


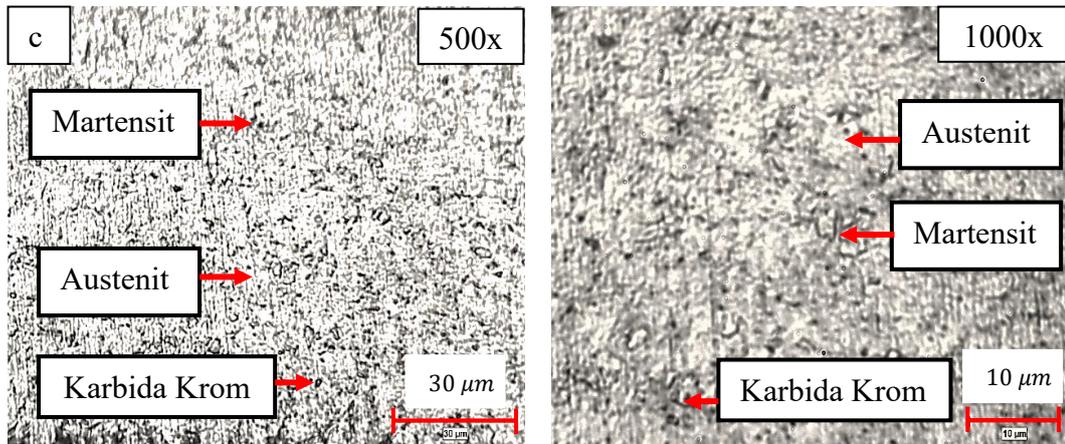
Gambar 4.1 Hasil Metalografi (a) T250 – H60 (b) T250 – H90 (c) T250 – H120





Gambar 4.2 Hasil Metalografi (a) T400 – H60 (b) T400 – H90 (c) T400 – H120

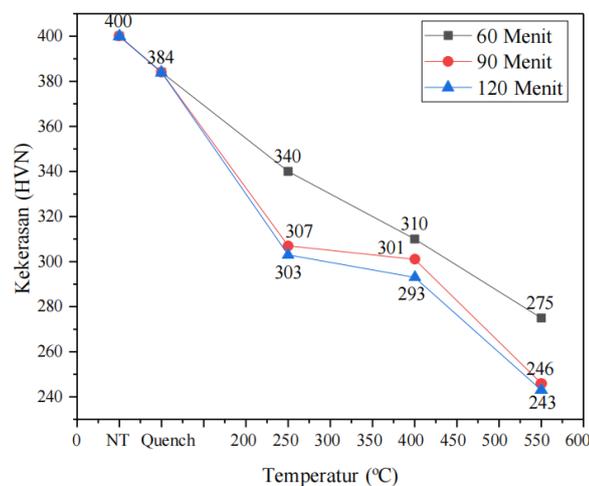




Gambar 4.3 Hasil Metalografi (a) T550 – H60 (b) T550 – H90 (c) T550 – H120

4.2 Analisa Kekerasan Material

Pada pengujian kekerasan, sampel *stainless steel 304 thin foil* yang telah melalui proses *quenching tempering* dengan temperatur 250°C, 400°C, 550°C menggunakan tiga variasi waktu tahan pada masing-masing temperatur yaitu, 60 menit, 90 menit dan 120 menit akan disesuaikan dengan dimensi standar pengujian uji kekerasan *micro vickers*. Indentor piramida berbentuk berlian diletakkan pada permukaan sampel. Terapkan beban sebesar 100 gf waktu pembebanan 10 detik. Data kekerasan pada tiap spesimen dengan jenis variasinya dapat dilihat sebagai berikut. Pertama dilakukan pengukuran dan pengambilan data pada spesimen T 250 dengan varian H 60, H 90, H 120. Kemudian didapatkan hasil rata-rata VHN T 250 yaitu H 60 (340 HV), H 90. (307 HV), dan H 120 (303 HV). Selanjutnya dilakukan pengambilan data kekerasan spesimen T 400 dengan varian yang sama dan didapatkan hasil VHN pada spesimen T 400 adalah H 60 (310 HV), H 90 (301 HV), dan H 120 (293 HV). Kemudian pada spesimen T 550 dengan varian yang sama didapatkan, H 60 (275 HV), H 90 (246 HV), H 120 (243 HV). Hasil dari data tersebut dapat dilihat pada grafik:



Gambar 4.4 Grafik Uji Kekerasan

4.2.1 Kekerasan Spesimen *Tempering* 250°C

Berdasarkan gambar 4.4 dapat terlihat bahwa kekerasan yang didapat oleh hasil *tempering* dengan temperatur 250°C waktu tahan 60, 90, 120 menit berturut-turut adalah 340 HV, 307 HV, dan 303 HV. Kekerasan dengan nilai paling tinggi adalah spesimen *tempering* temperatur 250°C waktu tahan 60 menit dengan nilai *Vickers Hardness* mencapai 340 HV. Selanjutnya seiring bertambahnya waktu tahan nilai kekerasan menurun yaitu pada waktu tahan 90 menit nilai kekerasannya 307 HV dan 120 menit turun menjadi 303 HV. Jika dilihat dari nilai kekerasannya pada temperatur 250°C nilai kekerasan masih relatif tinggi hal ini disebabkan setelah melalui proses *quenching*, struktur mikro material membentuk fasa martensit yang sifatnya sangat keras. Kemudian diberikan perlakuan *low tempering* (150 – 250°C) panas yang dihasilkan tidak cukup mengubah fasa martensit secara signifikan. *Low tempering* menghilangkan sedikit tegangan sisa yang terbentuk selama *quenching*, tetapi tidak cukup panas untuk terjadinya transformasi fasa menjadi struktur yang lebih lunak seperti ferrit atau bainit [31]. Fasa martensit tetap dominan, sehingga nilai kekerasannya masih tinggi tetapi seiring bertambahnya waktu tahan kekerasan menurun. Waktu tahan yang lebih lama memberi banyak waktu untuk relaksasi tegangan sisa dan memunculkan presipitat karbida yang dapat tumbuh menjadi ukuran yang lebih besar dan stabil. Karbida yang lebih besar mengurangi kekerasan karena menurunkan distorsi dalam kisi-kisi kristal.

4.2.2 Kekerasan Spesimen *Tempering* 400°C

Nilai kekerasan spesimen *tempering* 400°C dengan waktu tahan 60, 90, dan 120 menit yaitu 310 HV, 301 HV, 293 HV. Pada temperatur 400°C nilai kekerasan sudah mulai mengalami penurunan dibandingkan temperatur 250°C dan seiring bertambahnya waktu tahan nilai kekerasannya menjadi lebih turun. Pada temperatur ini, nilai kekerasan tertinggi yang didapat adalah 310 HV dengan waktu tahan 60 menit. Nilai kekerasan yang didapatkan mengalami penurunan cukup signifikan dibandingkan *tempering* 250°C dengan waktu tahan yang sama, hal ini disebabkan pada temperatur *middle tempering* (300-450°C) panas yang dihasilkan cukup untuk menghilangkan tegangan sisa sehingga struktur kristal menjadi lebih stabil dan mengurangi jumlah dislokasi. Akan tetapi, pada temperatur 400°C sensitasi dapat terjadi dimana presipitasi karbida kromium berdifusi di batas butir sehingga kromium di sekitar batas butir berkurang menciptakan area yang kekurangan kromium (*chromium depleted zone*). Jika karbida kromium terbentuk dalam jumlah besar, material dapat mengalami sensitasi yang dapat menyebabkan penurunan kekerasan di zona tertentu dan mengurangi ketahanan korosi intergranular [32].

4.2.3 Kekerasan Spesimen *Tempering* 550°C

Temperatur *tempering* 550°C nilai kekerasan yang didapatkan turun signifikan pada masing-masing waktu tahan dibandingkan dua temperatur

sebelumnya. Kekerasan yang didapatkan yaitu, 60 menit 275 HV, 90 menit 246 HV, dan 120 menit 243 HV. Nilai kekerasan tertinggi pada temperatur ini adalah 275 HV dengan waktu tahan 60 menit, dan semakin turun seiring bertambahnya waktu tahan. Hal ini disebabkan karena temperatur *high tempering* (>450°C) menghilangkan hampir semua tegangan internal yang tersisa akibat perlakuan *quenching* dan terjadi pergerakan dislokasi dalam kisi kristal, sehingga struktur mikro yang mengalami deformasi menjadi lebih homogen. Selain itu, pada *stainless steel 304 thin foil* hasil *quenching* diberikan perlakuan *high tempering* dapat memicu rekristalisasi pada temperatur 550°C sehingga terbentuknya butir baru yang bebas dari dislokasi. Butir yang terbentuk dari rekristalisasi memiliki dislokasi lebih sedikit dibandingkan butir hasil *quenching*, sehingga kekerasan menurun secara signifikan [32]. Adapun pengaruh lainnya dalam menurunkan kekerasan adalah terbentuknya karbida kromium di batas butir. Pembentukan ini menyebabkan deplesi kromium di sekitar batas butir yang mengurangi ketahanan deformasi dan kekerasan di zona tersebut.

4.3 Analisa Laju Korosi Material

Perhitungan laju korosi dilakukan dengan metode *weight loss*. Pengujian *weight loss* digunakan untuk mengetahui pengaruh proses *quenching tempering* spesimen *stainless steel 304 thin foil* terhadap ketahanan korosinya pada lingkungan korosif. Dalam metode ini, berat sampel sebelum (W_0) dan berat sampel setelah dilakukan perendaman dalam larutan H_2SO_4 0,01 M (W_1)

ditimbang menggunakan timbangan digital kemudian dicatat untuk menentukan laju korosinya. Perbedaan berat sampel awal dan akhir ini digunakan sebagai ukuran atau dasar untuk perhitungan laju korosi.

$$(\Delta W = W_0 - W_1) \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana: ΔW = Selisih kehilangan berat (gram)

W_0 = Berat awal (gram)

W_1 = Berat akhir setelah perendaman (gram)

Setelah didapatkan selisih berat, kemudian nilai laju korosi pada masing-masing spesimen dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2. Pada penelitian ini, *stainless steel 304 thin foil* sebagai spesimen uji dicelupkan kedalam larutan H_2SO_4 0,01 M selama 30 hari. Luas spesimen uji yang tercelup memiliki dimensi sebagai berikut:

Dilihat dari dimensi bentuk spesimen adalah balok, maka *surface area*-nya adalah sebagai berikut:

$$\text{Panjang} = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Leba} = 0,5 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal} = 0,01 \text{ cm}$$

Perhitungan luas area material yang terendam larutan korosi dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = 2 \times (p \times l + p \times t + l \times t) \dots \dots \dots (4.2)$$

$$A = 2 \times (5 \times 0,5 + 5 \times 0,01 + 0,5 \times 0,01)$$

$$A = 2 \times (2,5 + 0,05 + 0,005)$$

$$A = 5,11 \text{ cm}^2$$

Perhitungan laju korosi *stainless steel 304 thin foil* tanpa perlakuan dilakukan untuk mengetahui laju korosi *raw material* sebagai pembandingan dengan spesimen yang telah diberi perlakuan *quenching tempering*. Perhitungan laju korosi menggunakan larutan dan waktu perendaman yang sama dengan spesimen *quench-temper*. Berikut perhitungan laju korosinya:

Diketahui:

$$W_0 = 0,2523 \text{ gram}$$

$$W_1 = 0,2519 \text{ gram}$$

$$A = 5,11 \text{ cm}^2$$

$$K = 8,76 \times 10^4$$

$$D = 8 \text{ g/cm}^3$$

$$t = 720 \text{ jam}$$

maka hitung selisih berat dengan persamaan 4.1 hasilnya sebagai berikut:

$$= 0,2523 - 0,2520 \text{ (gram)}$$

$$= 0,0003 \text{ gram}$$

Kemudian hitung laju korosi dengan persamaan 2.2 berikut hasilnya:

$$= \frac{8,76 \times 10^4 \times 0,0003}{8 \times 5,11 \times 720}$$

$$= 0,0009 \text{ mm/year}$$

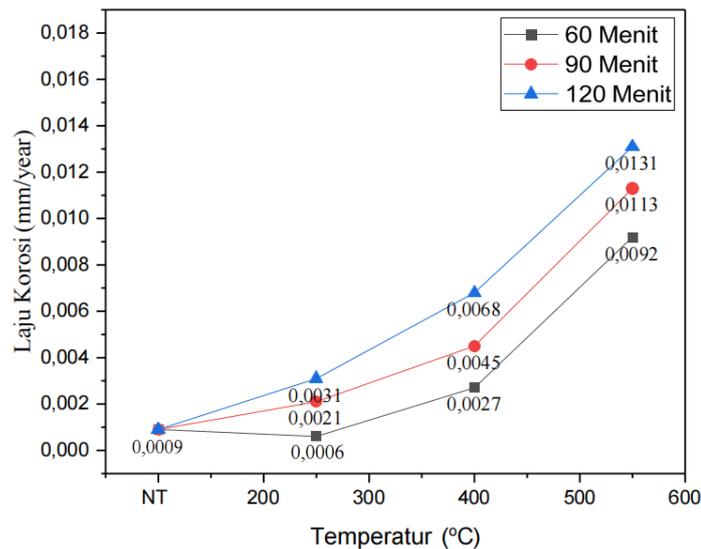
Dengan cara perhitungan yang sama dan waktu perendaman yang sama untuk spesimen tanpa perlakuan dengan spesimen setelah *quenching tempering* pada temperatur 250°C, 400°C, 550°C dan waktu tahan 60, 90, dan 120 menit didapatkan hasil laju korosi untuk T 250 – H 60 (0,0006 mm/y) H 90 (0,0021 mm/y) H 120 (0,0031 mm/y). Sementara itu, untuk T 400 diperoleh H 60 (0,0027

mm/y) H 90 (0,0045 mm/y) H 120 (0,0068 mm/y) kemudian untuk T 550 yaitu H 60 (0,0092 mm/y) H 90 (0,0113 mm/y) H 120 (0,0131 mm/y).

4.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi

Dilihat dari tabel 4.3 hasil perhitungan laju korosi bahwa besarnya temperatur tempering yang diberikan berpengaruh pada laju korosi yang terjadi. Meningkatnya temperatur dari 250°C, 400°C, dan 550°C menyebabkan laju korosi cenderung naik. Laju korosi yang terjadi pada spesimen dengan *tempering* 250°C relatif rendah begitu juga dengan temperatur 400°C, tetapi terus naik begitu temperatur *tempering* mencapai 550°C. Hasil perendaman yang dilakukan dalam waktu 30 hari tanpa perlakuan panas dan dengan perlakuan panas mendapatkan nilai yaitu untuk spesimen tanpa perlakuan panas dengan nilai laju korosi sebesar 0,0009 mm/year, sedangkan spesimen yang diberi perlakuan *tempering* T 250 - H 60 sebesar 0,0006 mm/y. Kemudian nilai laju korosi untuk T 250 – H 90 dan H 120 memiliki laju korosi yang lebih tinggi dari pada tanpa perlakuan yaitu H 90 (0,0021 mm/y) dan H 120 (0,0031 mm/y). Begitu juga saat temperatur *tempering* 400°C memiliki nilai laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa perlakuan dan *tempering* 250°C. Pada T 400 - H 60 didapatkan nilai 0,0027 mm/y lalu H 90 sebesar 0,0045 mm/y dan H 120 yaitu 0,0068 mm/y. Pada perlakuan T 400 – H 60 memiliki nilai laju korosi sedikit lebih rendah dibandingkan T 250 – H 120. Dapat diketahui bahwa walaupun temperatur *tempering* telah dinaikkan tidak selalu membuat nilai laju korosi semakin lebih besar dari temperatur yang lain, hal ini disebabkan lamanya waktu tahan juga berperan penting dalam mempengaruhi

besarnya kenaikan laju korosi. Selanjutnya T 550 – H 60, H 90, dan H 120 didapatkan laju korosinya yaitu 0,0092 mm/y, 0,0113 mm/y, dan 0,0131 mm/y. Pada T 550 ini kenaikan nilai laju korosi menjadi lebih signifikan lagi dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Selain itu pada T 250 dan T 400 kenaikan laju korosi tidak terlalu tinggi dari pada T 550, yang mana laju korosinya naik secara drastis dan melewati batas spesifikasi *corrosion rate* untuk aplikasi *diaphragm pressure gauge* sensor tekanan oli mesin yaitu maksimal 0,01 mm/year. Sehingga dapat diketahui peningkatan temperatur berpengaruh besar dengan naiknya laju korosi dimana kenaikan terjadi secara linear bila dihubungkan dengan kenaikan temperatur *tempering*. Penjelasan tersebut kemudian dibuat dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 4.5 Grafik Uji Laju Korosi vs Temperatur

Pada grafik dapat kita ketahui bahwa laju korosi paling tinggi terjadi pada spesimen dengan temperatur *tempering* 550°C yaitu terjadi kenaikan laju korosi

yang signifikan antara sampel tempering 250°C dan *tempering* 400°C. Hal ini dikarenakan setelah proses high *tempering* (suhu >450°C) terjadi perubahan pada struktur mikro yang memengaruhi komposisi kimia dan sifat pelindung lapisan pasif *stainless steel 304 thin foil*. Pada rentang temperatur ini sensitasi dapat terjadi akibat terbentuknya presipitasi karbida kromium dimana karbon yang larut dalam fasa austenit kemudian berikatan dengan kromium membentuk karbida kromium di batas butir sehingga efek dari terbentuknya presipitasi ini menyebabkan kromium di sekitar batas butir berkurang hingga di bawah batas minimum untuk membentuk lapisan pasivasi pada material [8]. Banyaknya kromium yang berikatan dengan karbon membentuk membuat kekurangan kromium di zona sensitasi, sehingga unsur kromium yang harusnya berikatan dengan oksigen membentuk lapisan tipis oksida kromium (Cr_2O_3) yang melindungi *stainless steel* dari korosi menjadi turun dan menyebabkan efektivitas lapisan pasif berkurang. Selain itu, presipitasi karbida kromium membuat ketidakseragaman dalam struktur mikro menyebabkan mikrogalvanik yang dapat mempercepat laju korosi. Hal ini terjadi karena perbedaan potensial elektroda dalam material, yang memicu mekanisme korosi elektrokimia sehingga presipitasi kromium di batas butir memiliki area dengan sifat elektrokimia yang berbeda. Area dengan kadar kromium lebih tinggi menjadi lebih tahan korosi (katodik), sementara area yang kekurangan kromium menjadi lebih rentan terhadap korosi (anodik) [19]. Perbedaan ini membentuk sistem sel galvanik mikro, dimana area anodik akan terkorosi lebih cepat.

Selanjutnya laju korosi pada temperatur *tempering* 400°C lebih rendah dari dibandingkan *tempering* 500°C. Untuk nilai laju korosi tertinggi yang didapatkan yaitu 0,0068 mm/y pada waktu tahan 120 menit, sedangkan 60, 90 menit yaitu 0,0027 mm/y dan 0,0045 mm/y. Laju korosi *middle tempering* (300-450°C) lebih rendah dibandingkan *high tempering* karena pada rentang temperatur ini presipitasi karbida kromium cenderung masih sedikit terbentuk, dimana austenit tetap dominan tanpa adanya transformasi fasa yang terjadi sehingga belum menyebabkan korosi yang signifikan dibandingkan *high tempering*. Tetapi pada *tempering* 400°C resiko terjadinya korosi mulai meningkat karena presipitasi karbida kromium sudah mulai terbentuk di batas butir, namun karena deplesi kromium yang masih sedikit ketahanan terhadap korosi tidak menjadi turun signifikan seperti pada *high tempering* [16].

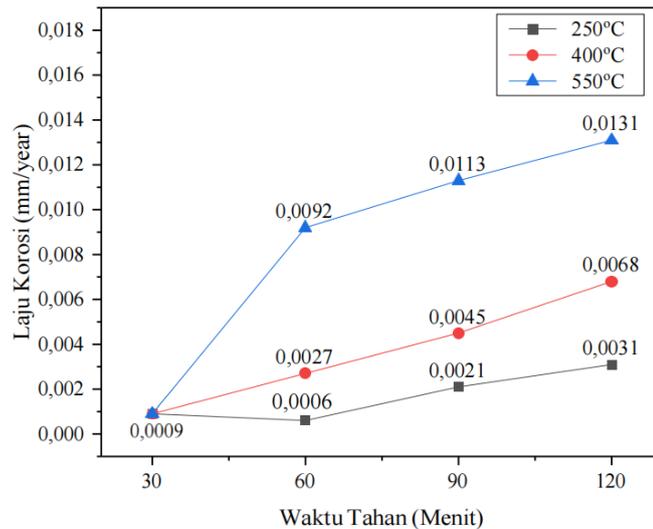
Sedangkan untuk *low tempering* yaitu temperatur 250°C laju korosi terjadi sangat rendah dibandingkan T 400 dan T 550 adapun laju korosi tertinggi yang didapatkan pada T 250 adalah dengan waktu tahan 120 menit dengan nilai 0,0031 mm/y. Dari grafik 4.5 dapat dilihat nilai laju korosi T 250 – H 120 sedikit lebih tinggi dari T 400 - H 60 hal ini dipengaruhi waktu tahan T 250 yang lebih lama dua kali lipat dari pada T 400 – H 60 walaupun T 400 temperaturnya lebih tinggi tetapi waktu tahan juga mempengaruhi struktur mikro dan komposisi kimia yang menyebabkan meningkatnya laju korosi. Tetapi secara rata-rata nilai laju korosi T 250 sangat rendah, ini dikarenakan pada T 250 lapisan pasif oksida kromium (Cr₂O₃) pada permukaan *stainless steel* tetap stabil. Temperatur T 250 masih rendah dan tidak cukup untuk menyebabkan difusi pengendapan karbida kromium

di batas butir, sehingga tidak terjadi deplesi kromium yang memperbesar laju korosi. Selain itu struktur mikro *stainless steel 304 thin foil* tetap stabil dan tidak terjadi transformasi fasa yaitu kromium tetap homogen dalam matriks austenitik tanpa membentuk presipitasi kromium karbida di batas butir yang menyebabkan sensitasi akibat batas butir yang kekurangan kromium [46]. Tetapi nilai laju korosi pada T 250 H 90 (0,0021 mm/y) dan H 120 (0,0031 mm/y), lebih tinggi dibandingkan spesimen tanpa perlakuan dengan laju korosi 0,0009 mm/y, serta spesimen T 250 H 60 yaitu (0,0006 mm/y) ini disebabkan *low tempering* merelaksasi tegangan sisa sehingga mengubah struktur oksida secara halus dan membuat lapisan pasif menjadi lebih tipis dibandingkan tanpa perlakuan.

4.3.2 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Laju Korosi

Waktu tahan *tempering* memengaruhi laju korosi *stainless steel 304 thin foil* karena lama waktu pemanasan pada temperatur tertentu memengaruhi perubahan struktur mikro dan sifat material. Waktu penahanan sangat berpengaruh pada saat transformasi karena apabila waktu penahanan yang diberikan kurang tepat maka transformasi fasa yang terjadi tidak sempurna dan tidak homogen mengakibatkan presipitasi karbida kromium tidak merata di batas butir sehingga terjadi konsentrasi kromium yang rendah di beberapa area [40]. Jika dilihat dari grafik 4.6 dengan temperatur *tempering* yang sama meningkatnya nilai laju korosi setiap kenaikan waktu tahan *tempering*. Untuk semua temperatur (T 250, T 400, T 550), laju korosi semakin besar ketika waktu tahan meningkat dari 60, 90 kemudian 120 menit. Nilai laju korosi pada T 250 – H 60, 90, 120 yaitu

0,0006 mm/y, 0,0021 mm/y dan 0,0031 mm/y. Lalu T 400 – H 60, 90, 120 yaitu 0,0027 mm/y, 0,0045 mm/y dan 0,0068 mm/y dan untuk T 550 – H 60, 90, 120 sebesar 0,0092 mm/y, 0,0113 mm/y dan 0,0131 mm/y. Hasil data terhadap waktu tahan dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 4.6 Grafik Uji Laju Korosi vs Waktu Tahan

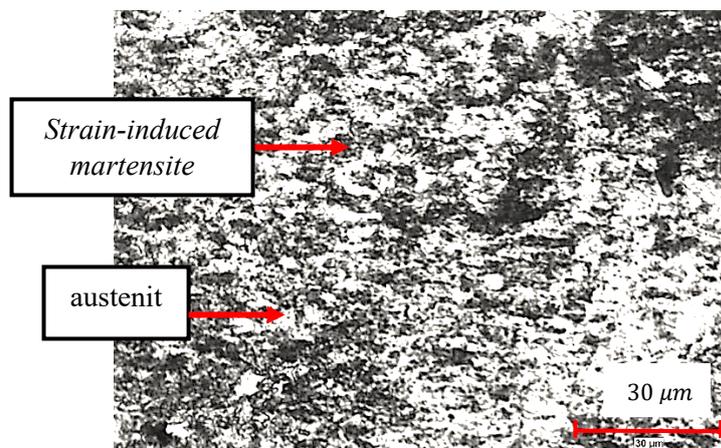
Pada grafik menunjukkan pengaruh variasi waktu tahan terhadap laju korosi hasil *tempering* menunjukkan nilai laju korosi tertinggi pada waktu tahan 120 menit disetiap temperatur *tempering*. Semakin lama waktu tahan maka semakin tinggi nilai laju korosi material. Besarnya laju korosi pada waktu tahan 120 menit disebabkan oleh banyaknya difusi kromium dari matriks austenit ke batas butir dan membentuk presipitasi karbida kromium. Proses difusi kromium membutuhkan waktu untuk menjadi karbida kromium di batas butir sehingga dengan waktu tahan yang lebih lama, presipitasi karbida kromium meningkat secara signifikan, menyebabkan deplesi kromium yang lebih luas di sekitar batas butir. Presipitasi karbida kromium menciptakan zona kekurangan kromium di

batas butir, yang melemahkan kemampuan pembentukan lapisan pasif Cr_2O_3 di area tersebut [10]. Pada waktu tahan 120 menit, deplesi kromium menjadi semakin parah, sehingga lapisan pasif tidak dapat melindungi batas butir dengan baik akibatnya laju korosi meningkat drastis. Sedangkan pada waktu tahan tempering 90 menit nilai laju korosinya lebih rendah dibandingkan 120 menit karena transformasi mikrostruktur yang masih dalam tahap awal dan belum masif. Pada waktu tahan 90 menit, presipitasi karbida kromium di batas butir sudah mulai terjadi, tetapi belum sepenuhnya berdifusi. Jumlah dan ukuran karbida yang terbentuk lebih kecil dan tidak memiliki banyak waktu untuk kromium berdifusi ke batas butir dibandingkan dengan waktu tahan 120 menit. Zona deplesi kromium di sekitar batas butir masih relatif kecil karena presipitasi karbida belum sepenuhnya mencapai kesetimbangan dan lapisan pasif di area matriks austenit masih dapat berfungsi sebagian untuk melindungi material dari serangan korosi. Kemudian dengan waktu tahan 60 menit memiliki nilai laju korosi terendah pada setiap temperatur tempering yang disebabkan oleh waktu tahan 60 menit tidak memberikan cukup waktu untuk proses difusi kromium dari matriks austenit ke batas butir, akibatnya presipitasi karbida hanya sedikit terjadi. Bahkan pada temperatur 250°C belum mengalami perubahan transformasi fasa yang signifikan dan waktu tahan hanya berpengaruh pada proses relaksasi tegangan sisa. Semakin lama waktu tahan tempering 250°C memberikan waktu tambahan bagi material untuk mencapai kondisi keseimbangan yang lebih stabil, sehingga mengurangi tegangan sisa lebih efektif tetapi juga meningkatkan nilai laju korosi meskipun pada 250°C tidak signifikan terjadi presipitasi karbida difusi unsur kromium dapat

mulai terjadi pada skala mikro akibatnya lapisan pasif menjadi lebih tipis dan akan semakin besar dengan bertambahnya waktu tahan sehingga dapat merusak lapisan pasif (Cr_2O_3) yang melindungi dari serangan korosi.

4.4 Hasil Pengamatan Metalografi

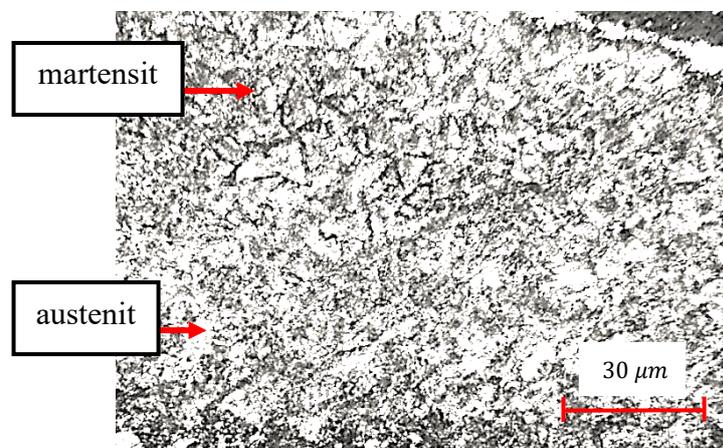
Pengamatan metalografi bertujuan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk efek dari perlakuan tempering dan memahami hubungan fasa-fasa tersebut dengan kekerasan dan ketahanan korosi *stainless steel 304 thin foil*. Dengan fokus pada tiga temperatur perlakuan, yaitu 250°C , 400°C , dan 550°C serta variasi waktu tahan 60, 90, 120 menit, kita dapat melihat fasa yang dihasilkan dan mengetahui penyebab dari naik turunnya nilai kekerasan dan laju korosi sehingga efektivitas treatment *quenching tempering* bisa dievaluasi. Selain itu diperlukan analisa awal struktur mikro spesimen tanpa perlakuan untuk mengetahui bagaimana respon material dan memastikan hasil perlakuan panas sesuai dengan kebutuhan aplikasi terhadap perlakuan panas yang diberikan. Berikut adalah struktur mikro *raw material stainless steel 304 thin foil*:



Gambar 4.7 Hasil Metalografi *Non-Treatment*

Pada *stainless steel 304 thin foil* tanpa perlakuan panas memiliki struktur mikro berbentuk butiran panjang dan terdeformasi. Butiran tampak tidak simetris seperti serat-serat panjang karena material mengalami peregangan akibat beban mekanis. Dari struktur mikro yang terlihat, dapat kita ketahui bahwa *stainless steel 304 thin foil* ini merupakan hasil *cold rolling*. Saat material mengalami *cold rolling*, jumlah dislokasi dalam kisi kristal meningkat drastis yang menyebabkan *strain hardening*. Semakin banyak deformasi plastis, semakin banyak dislokasi terbentuk sehingga kekerasan material meningkat karena pergerakan dislokasi semakin terhambat. Hal ini menjadi penyebab *raw material stainless steel 304 thin foil* memiliki nilai kekerasan yang tinggi yaitu mencapai 400 HV. Hasil *cold rolling* juga membentuk fasa martensit pada material. Sebagian fasa austenit dapat berubah menjadi martensit melalui mekanisme transformasi martensitik yang diinduksi oleh deformasi. Tekanan akibat deformasi menyebabkan perubahan fasa dari FCC ke BCT sehingga semakin besar reduksi ketebalan dalam *cold rolling*, semakin banyak martensit terbentuk.

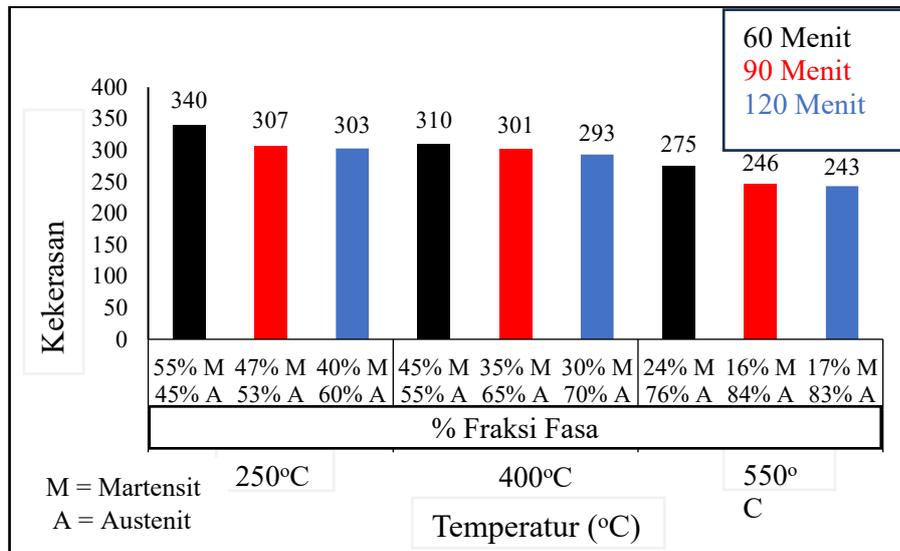
Pada *stainless steel 304 thin foil* ini sebelum di-*tempering* terlebih dahulu dilakukan proses *quenching* air biasa dengan pemanasan temperatur 900°C waktu tahan 60 menit. Kemudian juga didapatkan hasil struktur mikro sebagai berikut:



Gambar 4.8 Hasil Metalografi Perlakuan *Quenching*

Dari Gambar 4.8 dapat kita lihat struktur mikro yang dihasilkan yaitu dominan martensit, dan sedikit austenit. Permukaan spesimen terlihat kasar menandakan *quenching* pada *stainless steel* 304 menyebabkan transformasi yang menghasilkan fasa martensit dalam jumlah besar, seperti yang terlihat pada referensi Gambar 2.5. Ketika jumlah martensit meningkat, struktur menjadi lebih kasar dengan butiran yang tajam dan tidak homogen. Selain itu, material hasil *quenching* mengalami retakan mikro akibat *internal stress*, membuatnya terlihat lebih getas.

Selanjutnya data hasil struktur mikro *tempering* yang didapatkan berupa gambar hasil pengujian mikroskop optik dengan perbesaran 500x dan 1000x. Dilakukan perbesaran yang berbeda karena sulitnya melihat bentuk dan sebaran kelompok-kelompok fasa pada permukaan material. Melalui pengujian metalografi didapatkan fasa hasil perlakuan *quenching tempering* yaitu martensit dan fasa utama austenit. Persen sebaran fasa ini bervariasi setiap kenaikan temperatur dan waktu tahan *tempering* yang berpengaruh kepada kekerasan dan ketahanan korosi material. Untuk menentukan persentase area sebaran fasa martensit dan austenit pada gambar struktur mikro *stainless steel* 304 *thin foil*, dilakukan analisis menggunakan teknik *thresholding* dengan *software ImageJ*. Nilai dari % area fraksi fasa dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti temperatur *tempering* dan waktu tahan. Namun, pengaruh paling utama adalah temperatur *tempering* yang menyebabkan transformasi fasa martensit secara signifikan setiap kenaikan temperatur sehingga mempengaruhi nilai kekerasan material. Berikut adalah grafik persen fasa terhadap nilai kekerasan material:



Gambar 4.9 Persen Fraksi Fasa vs Nilai Kekerasan

Nilai kekerasan yang didapatkan terhadap kenaikan dan penurunan persen fraksi fasa austenit dan martensit, jika dilakukan perhitungan manual menggunakan metode *rule of mixtures* dengan rumus yaitu:

$$HV_{total} = (f_m \times HV_m) + (f_a \times HV_a) \dots \dots \dots (4.3)$$

Dimana: f_m = Persen fraksi martensit

f_a = Persen fraksi austenit

HV_m = Kekerasan martensit

HV_a = Kekerasan Austenit

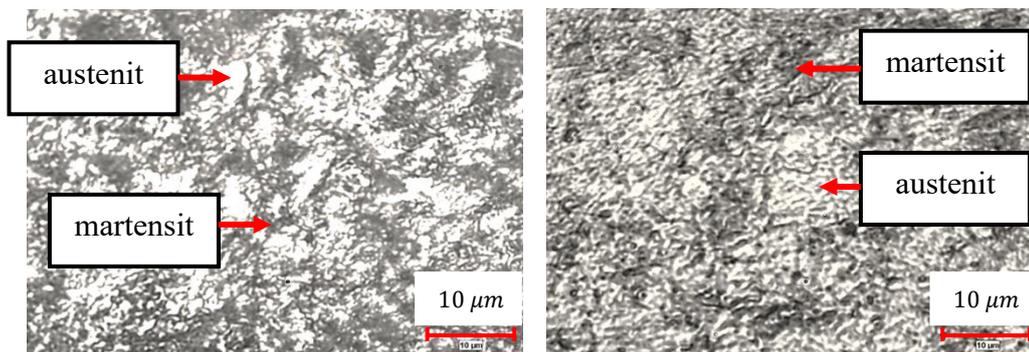
Dapat dilihat pada tabel 4.3 dan lampiran A.2, dari rumus tersebut didapatkan hasil yang cukup mendekati nilai kekerasan aktual hasil uji kekerasan *stainless steel 304 thin foil* terhadap sebaran fasanya pada gambar 4.9. Untuk hasil perhitungann dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kekerasan Metode *Rule of Mixtures*

Temperatur Tempering (°C)	Holding Time (menit)	Kekerasan
250	60	365
	90	341
	120	320
400	60	335
	90	305
	120	290
550	60	272
	90	248
	120	251

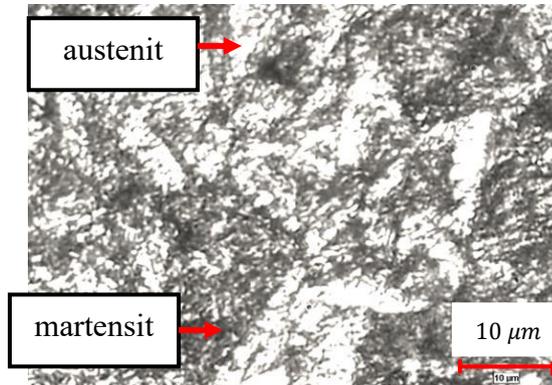
Fasa yang terbentuk pada pada temperatur *tempering* 250°C dengan variasi waktu tahan 60, 90, dan 120 menit dapat dilihat pada gambar 4.1. Pada Gambar 4.1 struktur mikro spesimen *stainless steel 304 thin foil* menunjukkan fasa yang terbentuk adalah austenit (γ), dan martensit (α). Austenit merupakan fasa utama dalam *stainless steel 304* karena baja tahan karat austenitik memiliki elemen seperti nikel (Ni) dan mangan (Mn) yang menstabilkan fasa austenit. Ciri-ciri struktur austenit pada pada gambar mikrograf diatas adakah area terang yang terlihat seragam. Sedangkan fasa martensit sisa perlakuan *quenching* pada proses sebelumnya masih terdapat pada spesimen *tempering* 250°C yang ditunjukkan area gelap acak dan memanjang. Seiring bertambahnya waktu tahan area martensit yang terbentuk cenderung terelaksasi atau menjadi martensit temper. Selanjutnya presipitasi karbida kromium mulai sedikit terbentuk yaitu pada temperatur 250°C, difusi karbon dan kromium di batas butir belum terjadi secara signifikan terutama dengan waktu tahan 60 menit, tapi tanda-tanda awal munculnya presipitasi sudah mulai terlihat di batas butir. Dengan waktu tahan 60 menit dapat kita amati struktur mikro martensit sisa *quenching* masih muncul dan tersebar dipermukaan

material, ini disebabkan pada temperatur *tempering* rendah (250°C), transformasi martensit menjadi austenit kembali (*reverse transformation*) tidak signifikan. Namun seiring bertambahnya waktu tahan *tempering* hanya menyebabkan relaksasi *internal stress* dan penurunan densitas dislokasi dalam struktur martensit temper [30]. Hal ini dapat dilihat dari gambar persen sebaran fraksi fasa berikut:



(a) 55% Martensit, 45% Austenit

(b) 47% Martensit, 53% Austenit



(c) 40% Martensit, 60% Austenit

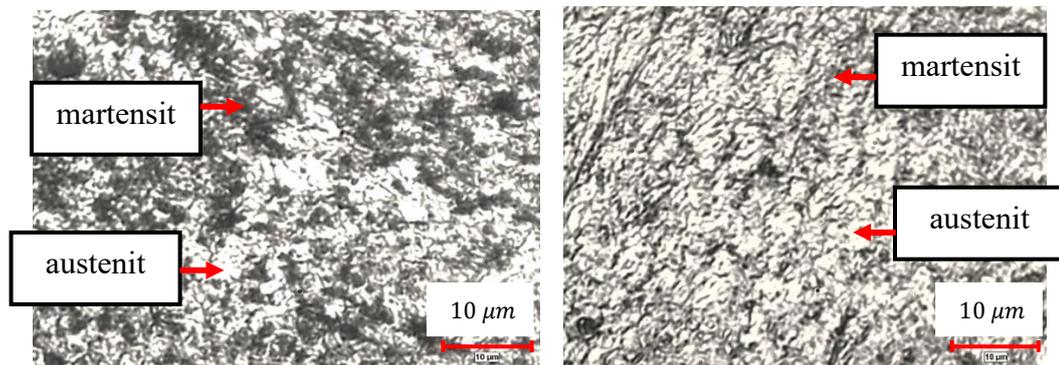
Gambar 4.10 Area Fasa T 250 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat pada temperatur 250°C bahwa persen area fasa martensit pada gambar berwarna gelap, cenderung masih tinggi untuk waktu tahan 60 menit dan semakin menurun dengan waktu tahan 90 menit dan 120 menit

sedangkan persen area fasa austenit yang berwarna terang mengalami peningkatan. Pada kondisi waktu tahan 60 menit, persen area martensit mencapai 55% dan austenit 45%. Namun, ketika waktu tahan dinaikkan ke-90 menit, persen area martensit menurun menjadi 47% lalu area austenit meningkat menjadi 53%. Selanjutnya, pada waktu tahan 120 menit terjadi penurunan persen area martensit dan kenaikan persen area austenit menjadi 40% dan 60%. Penambahan waktu tahan *tempering* cukup memiliki dampak signifikan terhadap relaksasi struktur martensit. Pada 250°C, difusi karbon masih sangat terbatas karena temperatur yang rendah. Namun dengan waktu yang lebih lama, karbon dapat mulai berdifusi keluar dari martensit membentuk struktur yang lebih stabil yaitu martensit temper. Akibat masih banyaknya fasa martensit pada *tempering* 250°C yang memiliki karakteristik kekerasan yang tinggi dan rapuh, sehingga berpengaruh pada tingginya nilai kekerasan yang didapatkan pada temperatur ini yaitu H 60 (340 HV), H 90 (307 HV), dan H 120 (303 HV). Selain itu juga ditemukan adanya indikasi pembentukan presipitat krom karbida dilihat dari kenaikan laju korosi *tempering* 250°C dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Dengan temperatur *tempering* 250°C pembentukan presipitat krom karbida sangat lambat karena difusi atom kromium dan karbon memerlukan energi aktivasi yang cukup besar. Tetapi dengan memperlama waktu tahan, difusi atom dapat terjadi secara perlahan dan presipitat mulai sedikit terbentuk sehingga dengan H 60, presipitasi masih dalam tahap awal yang membuat ukuran dan distribusinya kecil. Hanya sedikit atom *chromium* yang berdifusi di sepanjang batas butir dalam struktur mikro. Kemudian H 90, presipitat karbida masih sedikit tersebar di matriks austenit tetapi

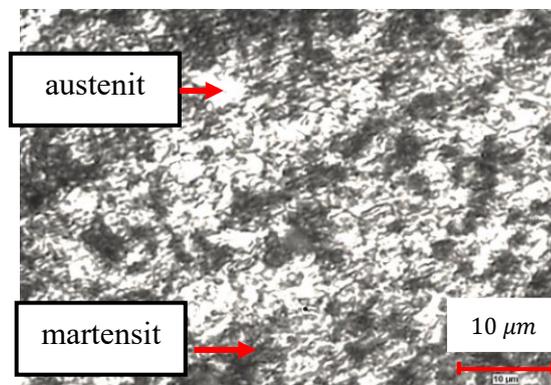
ukurannya sudah lebih besar dibandingkan H 60 dan naiknya waktu tahan ke-H 120 presipitat akan terbentuk lebih banyak lagi di batas butir dan terkonsentrasi didalam matriks membuat ukuran semakin luas. Dengan itu dapat dipahami bahwa semakin bertambahnya waktu tahan difusi atom kromium dan karbon menjadi lebih signifikan, sehingga presipitat akan bertambah besar dan lebih banyak. Hal ini juga menjadi penyebab naiknya laju korosi pada tempering 250°C setiap bertambahnya waktu tahan karena presipitat yang semakin besar meningkatkan zona kekurangan kromium di sekitar batas butir mengakibatkan penurunan ketahanan korosi.

Selanjutnya didapatkan gambar struktur mikro perlakuan *tempering* 400°C dengan waktu tahan yang sama, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.2 dapat diketahui bahwa analisa visual didapatkan fasa martensit dan austenit. Fasa martensit masih dapat ditemukan pada *tempering* 400°C dengan H 60, H 90, H 120 tetapi seiring bertambahnya waktu tahan, fasa martensit terlihat sedikit berkurang dan jika dibandingkan *tempering* 250°C dengan waktu tahan yang sama, sebaran fasa martensit 400°C tidak sebanyak 250°C. Adanya fasa martensit disebabkan oleh temperatur 400°C belum cukup untuk metransformasi martensit menjadi fasa stabil austenit. Hanya saja pada temperatur ini, fasa martensit lebih terelaksasi yaitu atom karbon yang sebelumnya terperangkap dalam struktur martensit mulai bergerak, menghasilkan martensit temper yang lebih stabil tetapi masih mempertahankan bentuk kristalnya sehingga fasa martensit tidak sepenuhnya hilang. Berikut adalah gambar perhitungan persen sebaran fasa pada *tempering* 400°C:



(a) 45% martensit, 55% Austenit

(b) 35% Martensit, 65% Austenit



(c) 30% Martensit, 70% Austenit

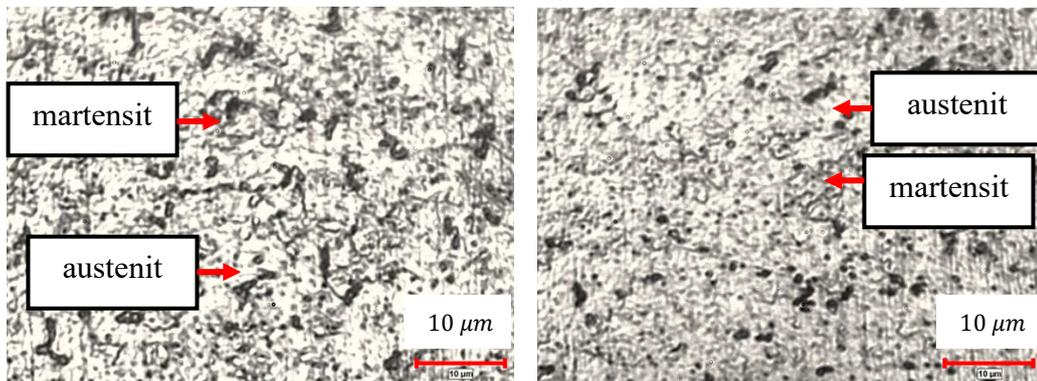
Gambar 4.11 Area Fasa T 400 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Berdasarkan Gambar 4.11 terlihat bahwa seiring bertambahnya waktu tahan, fasa austenit cenderung meningkat sedangkan fasa martensit menurun cukup signifikan. Hal ini disebabkan pada temperatur 400°C, transformasi martensit menjadi austenit sudah mulai terjadi dibandingkan temperatur 250°C. Dengan menaikkan temperatur memberikan tambahan energi untuk atom karbon lebih cepat berdifusi keluar dari martensit menyebabkan kestabilan struktur martensit menurun, sehingga memicu transformasi kembali menjadi fasa stabil austenit. Hal ini juga berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang didapatkan, dapat kita lihat

Gambar 4.4 nilai kekerasan *tempering* 400°C tidak turun terlalu jauh dibandingkan *tempering* 250°C. Selanjutnya struktur mikro austenit tetap menjadi matriks utama dalam *stainless steel 304 thin foil* karena pada temperatur 400°C, energi aktivasi untuk difusi atom sangat rendah dan difusi atom berjalan sangat lambat atau bahkan tidak terjadi sehingga tidak cukup menggerakkan atom-atom untuk berdifusi seperti karbon atau kromium bertransformasi membentuk fasa lain. Selain itu elemen paduan seperti nikel (Ni) dan mangan (Mn) membuat austenit menjadi stabil. Tetapi pembentukan presipitat karbida kromium pada *stainless steel 304 thin foil* selama *tempering* 400°C dapat terjadi secara lambat sehingga presipitasi karbida terbentuk dalam jumlah kecil dan meningkat seiring bertambahnya waktu tahan [16]. Pada penelitian ini spesimen sebelumnya diberikan perlakuan *quenching* dari temperatur rekristalisasi (900°C) sehingga atom karbon dan kromium terjebak dalam larutan padat (*solid solution*) di dalam matriks austenit. Lalu diberikan *tempering* pada 400°C memicu pelepasan karbon dan kromium sehingga presipitat mulai terbentuk di batas butir.

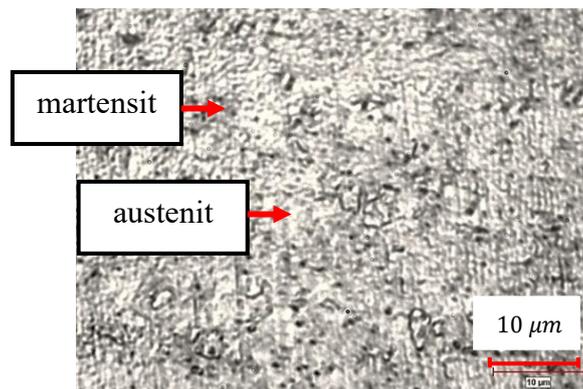
Sementara pada Gambar 4.3 didapatkan hasil pengamatan struktur mikro hasil perlakuan *tempering* 550°C. Setelah diamati dapat kita lihat seiring dengan meningkatnya waktu tahan dari H 60, H 90, kemudian H 120 diperoleh hasil permukaan yang cenderung lebih halus serta butir tersebar secara merata dan homogen. Fasa martensit masih dapat ditemukan pada *tempering* 550°C tetapi ukuran dan sebarannya sudah jauh berkurang dibandingkan T 250 dan T 400. Selain itu dengan bertambahnya waktu tahan fasa martensit semakin bertransformasi menjadi fasa stabil austenit bahkan dengan H 120 struktur

martensit sudah sangat kecil dan cenderung seluruhnya austenit disertain sebaran *grain size* yang homogen. Persen sebaran fasanya dapat dilihat pada gambar berikut:



(a) 24% Martesit, 76% Austenit

(b) 16% Martensit, 84% Austenit



(c) 17% Martensit, 83% Austenit

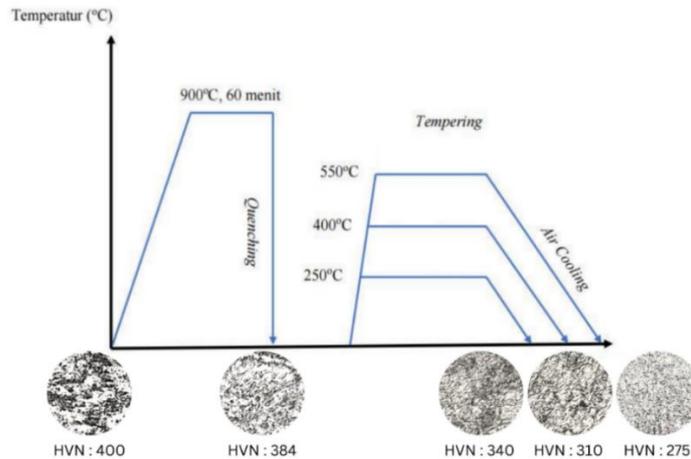
Gambar 4.12 Area Fasa T 550 (a) H 60, (b) H 90, (c) H 120

Pada Gambar 4.12 didapatkan hasil yaitu, dengan meningkatnya temperatur *tempering* 550°C dan seiring bertambahnya waktu tahan dari 60, 90, sampai 120 menit, diperoleh hasil sebaran fasa martensit yang semakin menurun dibandingkan temperatur 250°C dan 400°C, sedangkan fasa austenit semakin mendominasi. Dari masing-masing gambar dapat kita lihat perbedaan sebaran fasa

martensit, ditunjukkan area berwarna gelap yang semakin mengecil dan jarang diantara fasa utama austenit yang semakin meningkat seiring dengan naiknya temperatur *tempering* dan waktu tahan. Difusi karbon lebih aktif pada temperatur 550°C menyebabkan atom karbon keluar dari martensit dan larut ke dalam matriks austenit atau membentuk presipitat karbida krom di batas butir [8]. Pada gambar T 550 – H 60 mikrostruktur menunjukkan peningkatan homogenitas dengan sedikit adanya bintik-bintik hitam memanjang yang mengindikasikan masih terdapat fasa martensit yang belum bertransformasi ke fasa austenit. Hal ini dapat terjadi karena, temperatur 550°C difusi atom menjadi lebih aktif dibandingkan T 250 dan T 400 sehingga sudah cukup untuk menstabilkan fasa martensit menjadi austenit, tetapi adanya pengaruh waktu tahan 60 menit belum secara tuntas menyelesaikan difusi atom karbon yang masih terperangkap dalam martensit, akibatnya struktur martensit tetap ada sebagian karena karbon belum sepenuhnya meninggalkan matriks martensit dan menjaga distorsi kristal *body centered tetragonal* (BCT). Kemudian dengan bertambahnya waktu tahan H 90, memberikan waktu tambahan untuk karbon berdifusi ke matriks austenit atau batas butir membentuk karbida. Hal ini berpengaruh dengan semakin berkurangnya fasa martensit pada H 90 dibandingkan H 60 yang ditandai dengan bitnik-bintik hitam yang semakin sedikit. Lalu dengan *tempering* 550°C H 120 fasa martensit cenderung sudah tidak terlihat dan hampir semuanya bertransformasi menjadi austenit yang homogen dan sebaran butir lebih merata. Hal ini mengindikasikan pada *tempering* 550°C dengan waktu tahan ≥ 120 menit sudah cukup untuk atom karbon bergerak keluar dari martensit menuju matriks austenit atau ke batas butir membentuk presipitasi sehingga fasa martensit signifikan berkurang. Disebabkan banyaknya fasa martensit yang bertransformasi dan tegangan sisa hasil *quenching* yang

sepenuhnya terelaksasi, hal ini berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang turun signifikan pada *tempering* 550°C disemua waktu tahan. Selain itu, dengan *tempering* 550°C pembentukan presipitas karbida krom meningkat dibandingkan T 250 dan T 400. Peningkatan temperatur *tempering* memberikan energi aktivasi yang besar pula kepada atom-atom karbon dan kromium yang terdapat dalam fasa austenit untuk bergerak atau berdifusi ke batas butir. Ketika atom karbon bereaksi dengan atom kromium maka akan membentuk karbida kromium pada batas butir atau dalam matriks. Semakin banyak presipitat karbida krom terbentuk maka semakin besar juga area yang kekurangan atom kromium (*chromium depleted zone*) sehingga kadar atom kromium (Cr) terlalu rendah untuk membentuk lapisan pasivasi Cr₂O₃ yang dapat menyebabkan material *stainless steel 304 thin foil* hasil *tempering* 550°C lebih rentan terkena serangan korosi. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 yaitu *tempering* 550°C menunjukkan kenaikan laju korosi yang signifikan dibandingkan T 250 dan T 400 yang disebabkan banyaknya terbentuk presipitasi karbida kromium yang menurunkan ketahanan korosi *stainless steel 304 thin foil*.

Berdasarkan penjelasan hasil struktur mikro *stainless steel 304 thin foil* diatas, dapat ditampilkan secara ringkas skematik diagram proses perlakuan panas serta perubahan mikrostruktur dari *raw material*, hasil *quenching*, kemudian setelah diberikan variasi perlakuan *tempering*. Hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.13 Skematik Proses Perlakuan dan Hasil Struktur Mikro

Pada spesimen *raw material* butiran tampak tidak simetris seperti serat-serat panjang karena material mengalami peregangan akibat beban mekanis *cold rolling*. Saat material mengalami *cold rolling*, jumlah dislokasi dalam kisi kristal meningkat drastis yang menyebabkan *strain hardening*. Selanjutnya setelah austenisasi 900°C waktu tahan 60 menit material di-*quenching* dengan media air biasa dan menghasilkan struktur mikro dominan martensit dan sedikit austenit. Permukaan spesimen terlihat kasar dengan butiran yang tajam dan tidak homogen. Selanjutnya diberikan perlakuan *tempering*, dengan *tempering* pertama pada temperatur 250°C menghasilkan struktur martensit temper dan terlihat permukaan menjadi lebih halus dibandingkan hasil *quenching*. Kemudian *tempering* 400°C, fasa martensit sudah cenderung berkurang, tetapi temperatur 400°C belum cukup untuk metransformasi martensit seluruhnya menjadi fasa stabil austenit. Lalu pada *tempering* 550°C hampir semuanya bertransformasi menjadi austenit, tetapi pertumbuhan presipitat karbida semakin masif sehingga menurunkan ketahanan korosi pada *stainless steel 304 thin foil*.