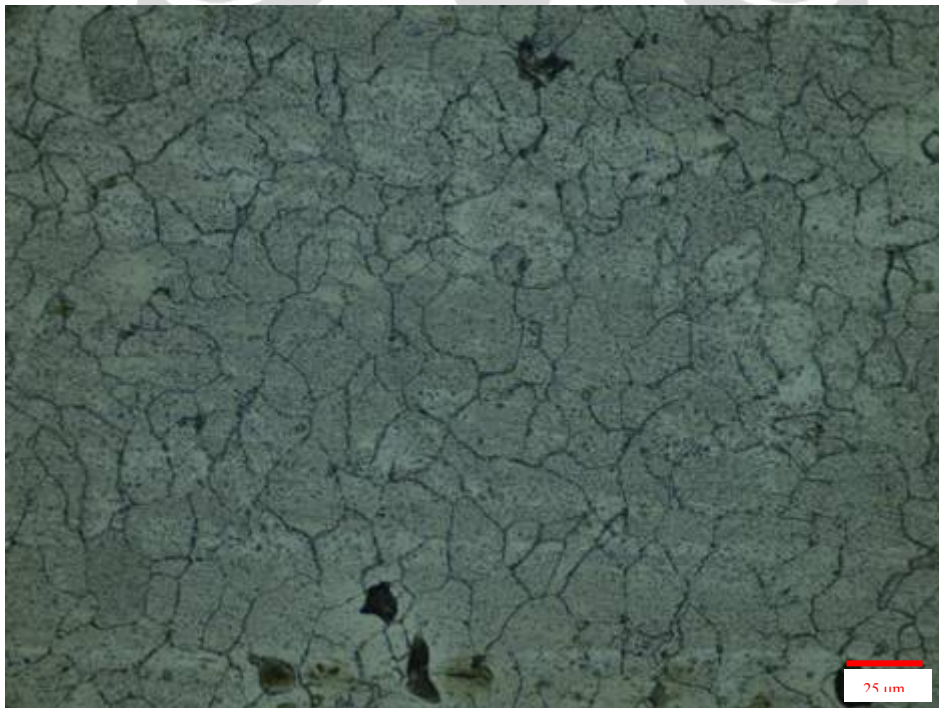


BAB IV HASIL PENELITIAN

4.1 Struktur Mikro Butir Austenit

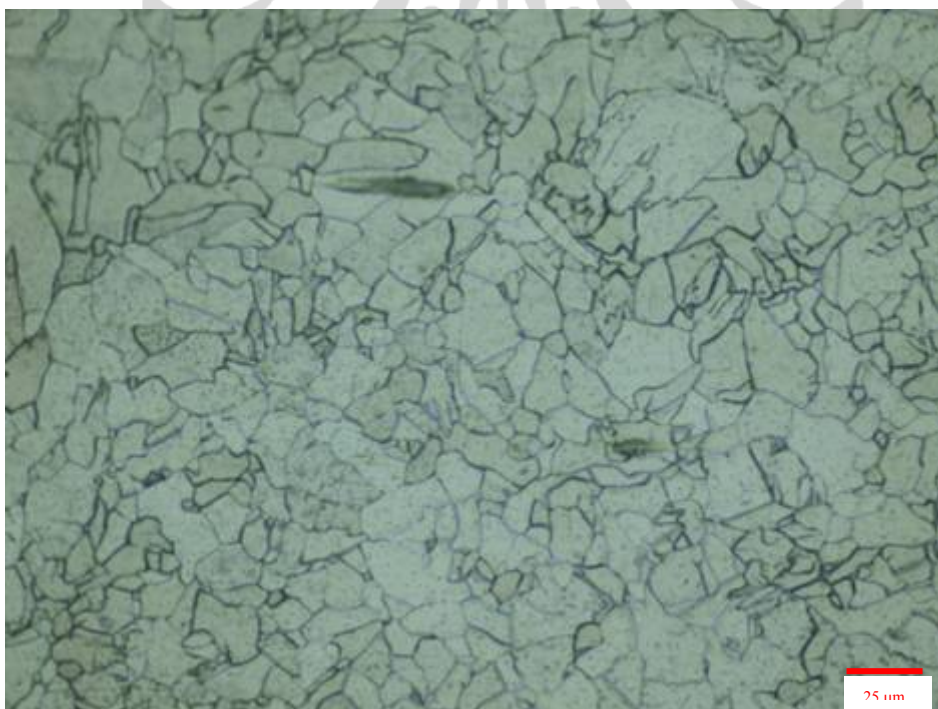
Gambar 4.1 sampai 4.12 menampilkan struktur mikro austenit hasil perlakuan panas dan deformasi panas. Struktur austenit diperoleh dengan menggunakan etsa Vilella reagent (*modified*). Komposisi etsa yaitu: 1/5 gr asam pikrat + 20 ml alkohol + 1 ml HCl + 40 ml aquadest. Pengukuran butir menggunakan metode Intercept-Heyn berdasarkan standard ASTM E112. Perincian perhitungan dapat dilihat pada Tabel L3.2 di Lampiran 3. Dari pengamatan struktur menunjukkan pengaruh dari regangan terhadap ukuran butir austenit hasil deformasi panas pada setiap interval waktu tahanan. Pembahasan mengenai perubahan struktur austenit dijelaskan pada sub bab 5.1.



Gambar 4.1 Struktur Mikro Butir Austenit Prior Baja C-Mn dengan Pemanasan Ulang 1150 °C dan temperatur celup 1060 °C. (Perbesaran 500X)



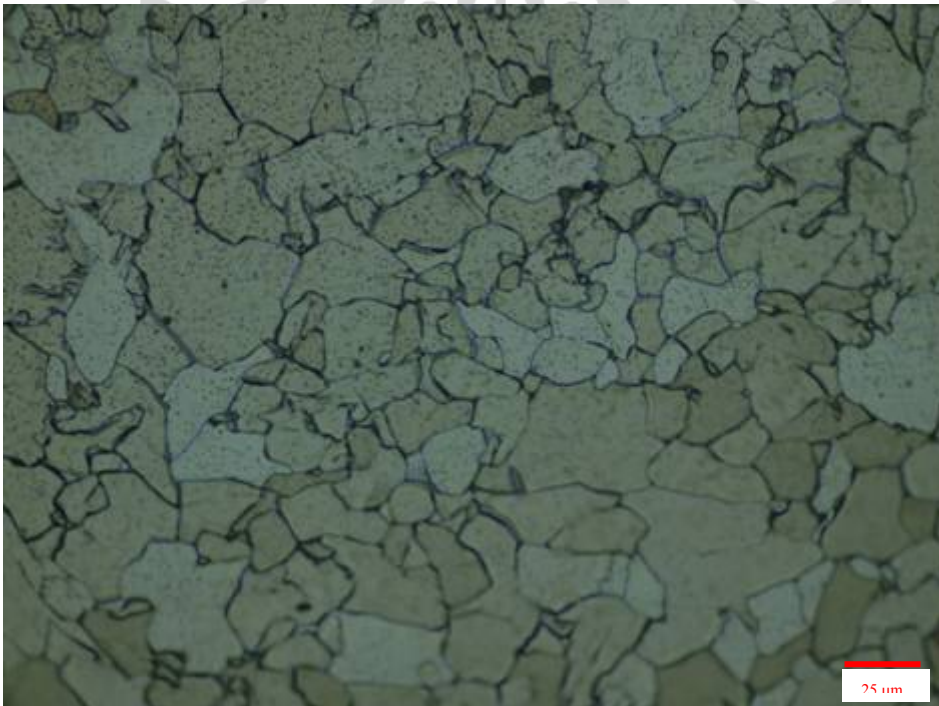
Gambar 4.2 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



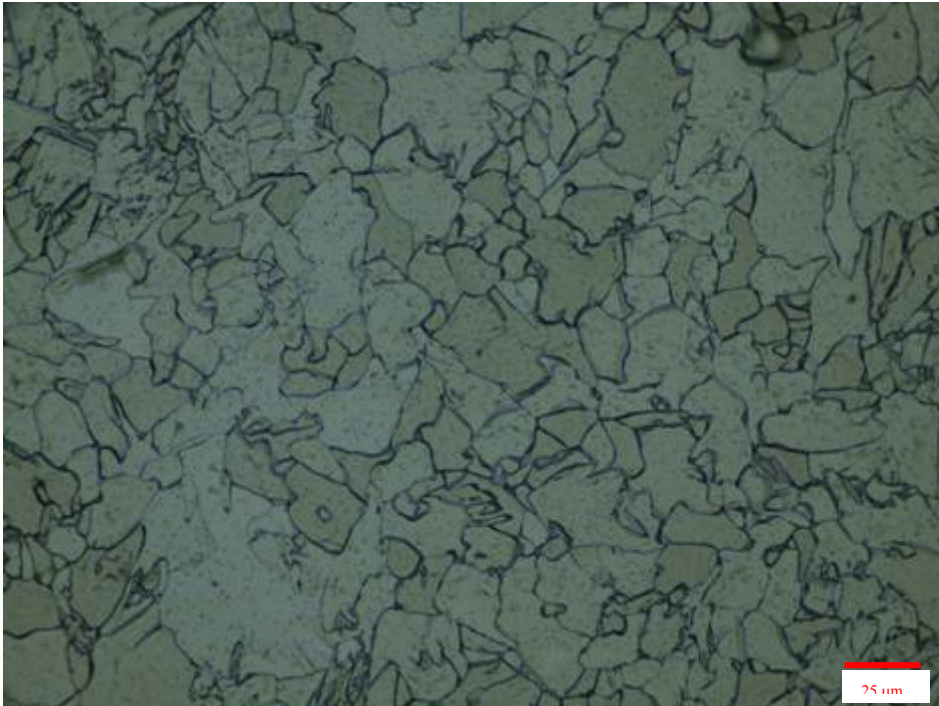
Gambar 4.3 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.4 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ε 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 10 detik. (Perbesaran 500X)



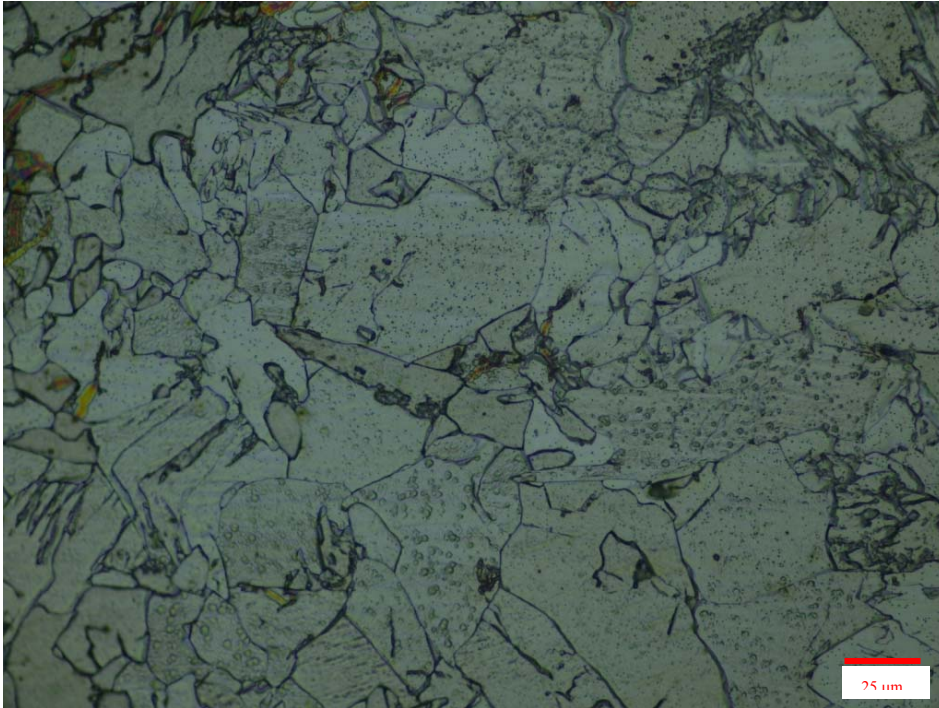
Gambar 4.5 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ε 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



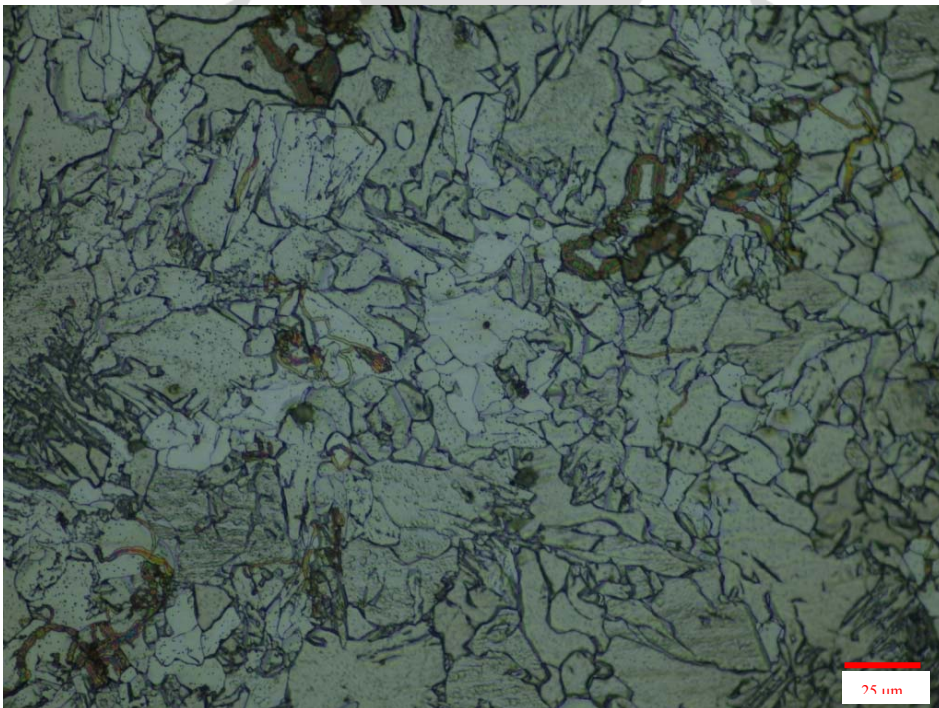
Gambar 4.6 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



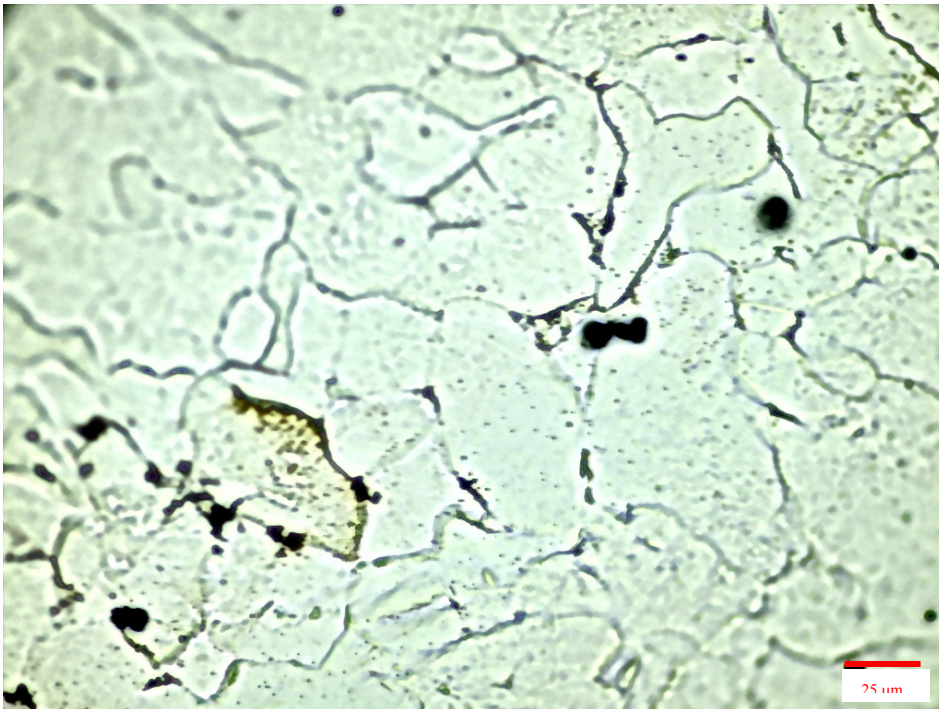
Gambar 4.7 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 10 detik. (Perbesaran 500X)



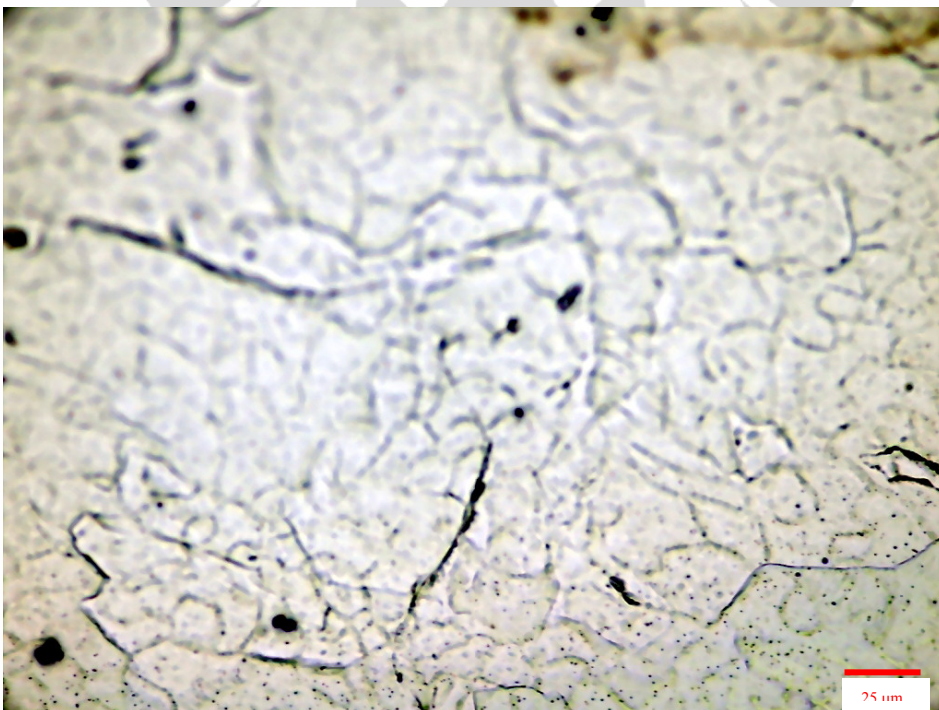
Gambar 4.8 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,5, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



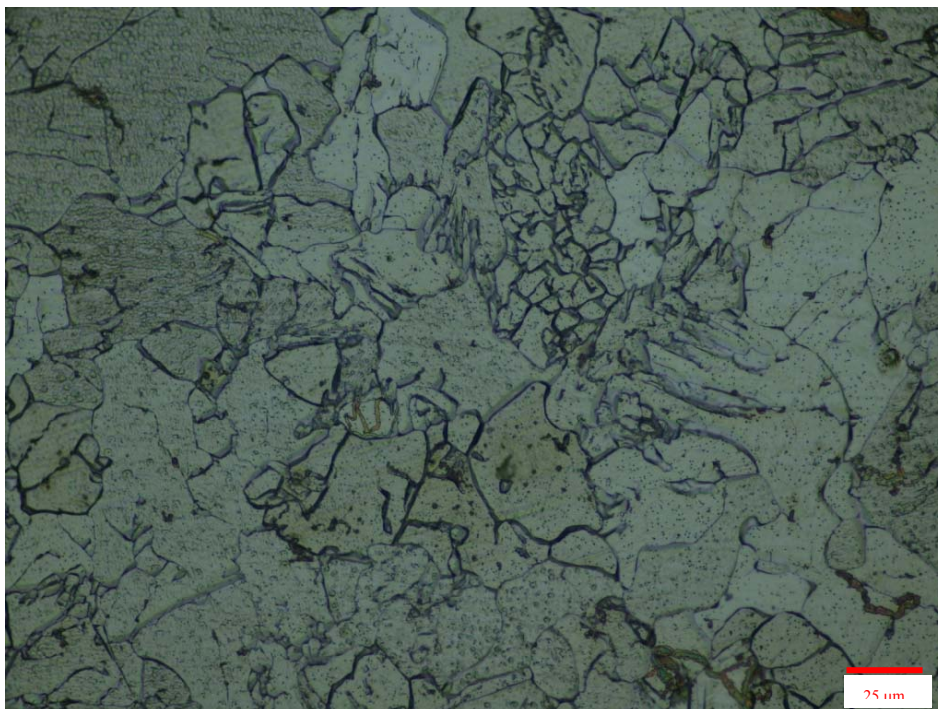
Gambar 4.9 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,5, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.10 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.11 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.12 Struktur Mikro Butir Austenit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)

4.2 Hasil pengukuran butir austenit setelah canai panas

Tabel 4.1 memperlihatkan hasil pengukuran butir austenit rata-rata berdasarkan struktur mikro pada gambar 4.1 sampai 4.12 dimana perubahan regangan 0,1 menjadi 0,2 dan kemudian 0,5 menghasilkan ukuran yang semakin kecil. Perbesaran ukuran butir pada interval 10 detik untuk regangan 0,1 dan interval 5 dan 10 detik untuk regangan 0,2 pada temperatur 1060 °C memperlihatkan adanya pertumbuhan butir setelah deformasi panas. Dalam hal ini dapat dikatakan, proses rekristalisasi terjadi cukup cepat pada masing-masing regangan. Sedangkan pada temperatur lebih rendah, 960 °C, memiliki ukuran butir austenit lebih besar dibandingkan temperatur lebih tinggi.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Besar Butir Austenit ($d\gamma$) pada setiap deformasi (ϵ) dan temperatur deformasi (T_1) dengan waktu tahan (t) sebelum celup air

No	T_1 (°C)	$d\gamma$ (μm)									
		ϵ	0,1			0,2			0,5		
		t	1	5	10	1	5	10	1	5	
1	1060		45.7	25.55	22.48	21.62	19.38	19.72	19.05	17.55	15.26
2	960		45.7	27.42	20.44		25.61				

Berdasarkan perumusan Yada[7], waktu rekristalisasi dapat dihitung dari persamaan (2.5) menurut besar regangan dan temperatur deformasi serta ukuran butir mula-mula austenit (deformasi 0). Waktu untuk selesainya rekristalisasi dapat dihitung berdasarkan fraksi 95% dengan:

$$t = \sqrt{\left(\frac{\ln(1 - X_{st})}{-0,693}\right)} \times t_{0,5}$$

dimana

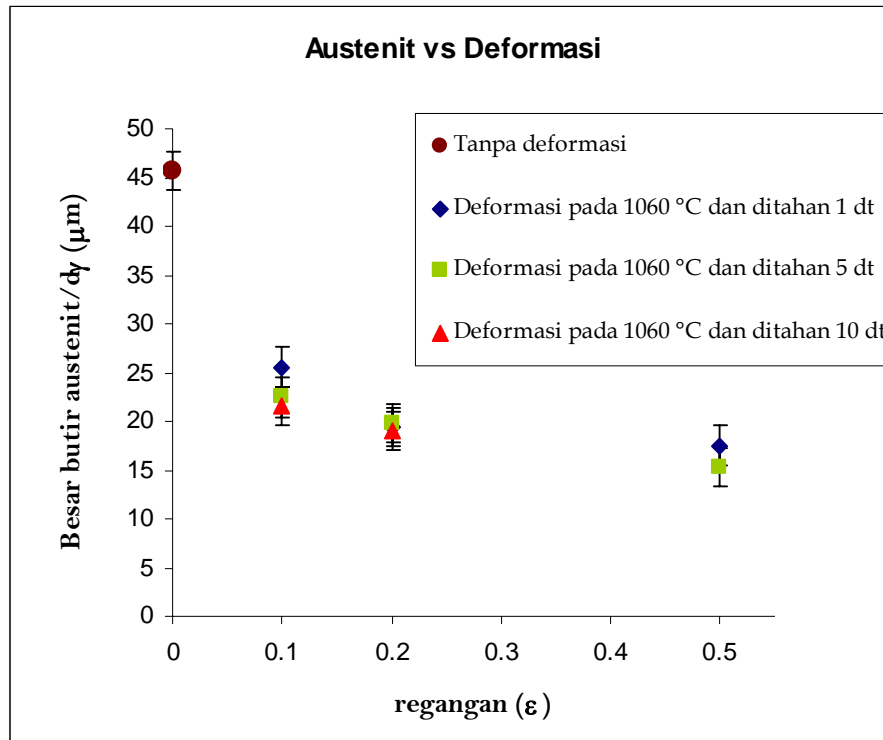
$$t_{0,5} = 2,2 \cdot 10^{-12} \times S_v^{-0,5} \times \dot{\epsilon}^{-0,2} \times \text{EXP}\left(\frac{30000}{T}\right)$$

$$S_v = \left(\frac{24}{\pi} \times d_0\right) \times (0,49 e^{\epsilon} \times 0,155 e^{-\epsilon} \times 0,1433 e^{-3\epsilon})$$

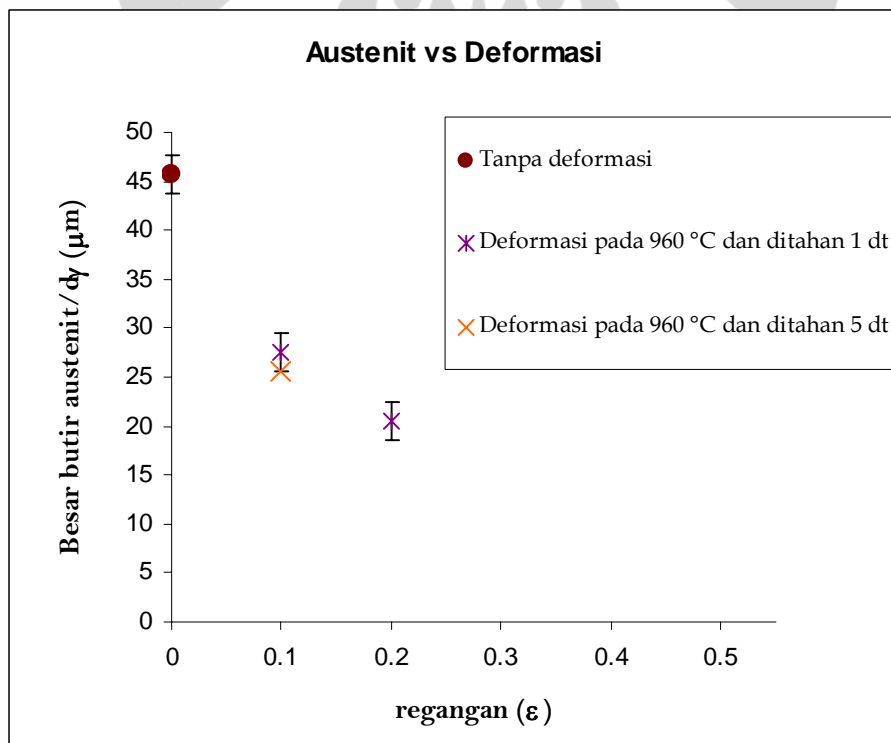
Melalui perumusan tersebut, maka dapat dihitung waktu dari masing-masing fraksi rekristalisasi. Pada temperatur deformasi 1060 °C, dengan ukuran butir austenit mula-mula 45,7 µm, rekristalisasi 95% untuk regangan 0,1 terjadi dalam waktu 6,232 detik, dan untuk regangan 0,2 terjadi dalam waktu 1,432 detik. Perhitungan ini cukup menjelaskan pertumbuhan butir yang terjadi temperatur tersebut. Sedangkan pada temperatur 960 °C, rekristalisasi 95% terjadi dalam waktu cukup lama yaitu 38,664 detik untuk regangan 0,1 dan 8,885 detik untuk regangan 0,2.¹

Plot grafik hasil pengukuran besar butir austenit rata-rata dapat dilihat pada Gambar 4.13 dan 4.14.

¹ Hasil lengkap mengenai perhitungan waktu rekristalisasi menurut persamaan Yada dapat dilihat pada Lampiran 2.



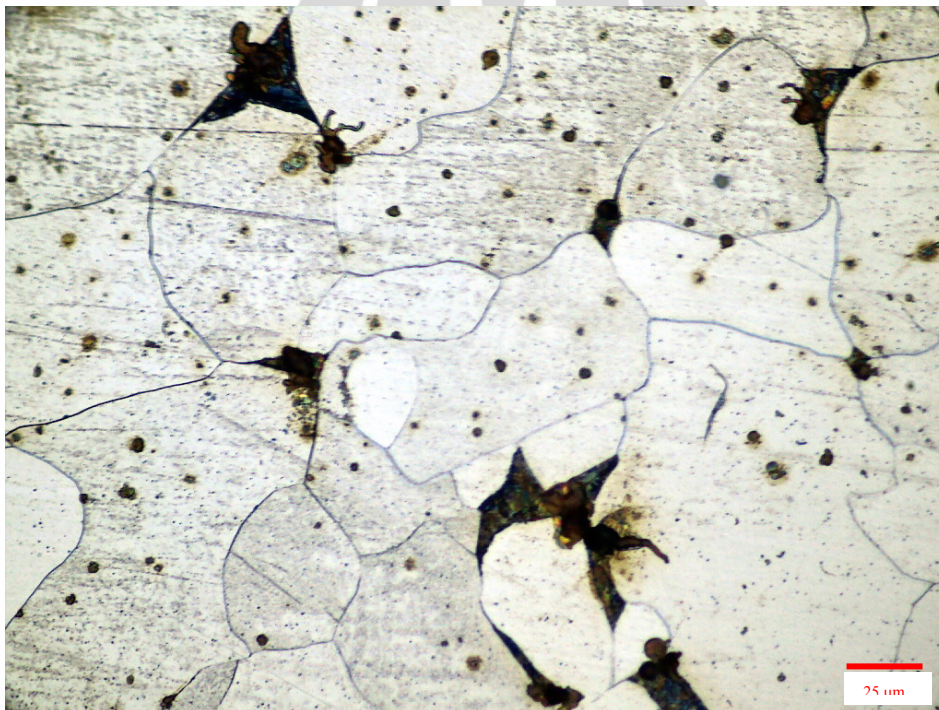
Gambar 4.13 Grafik Ukuran Butir Austenit terhadap regangan pada Temperatur Deformasi 1060 °C.



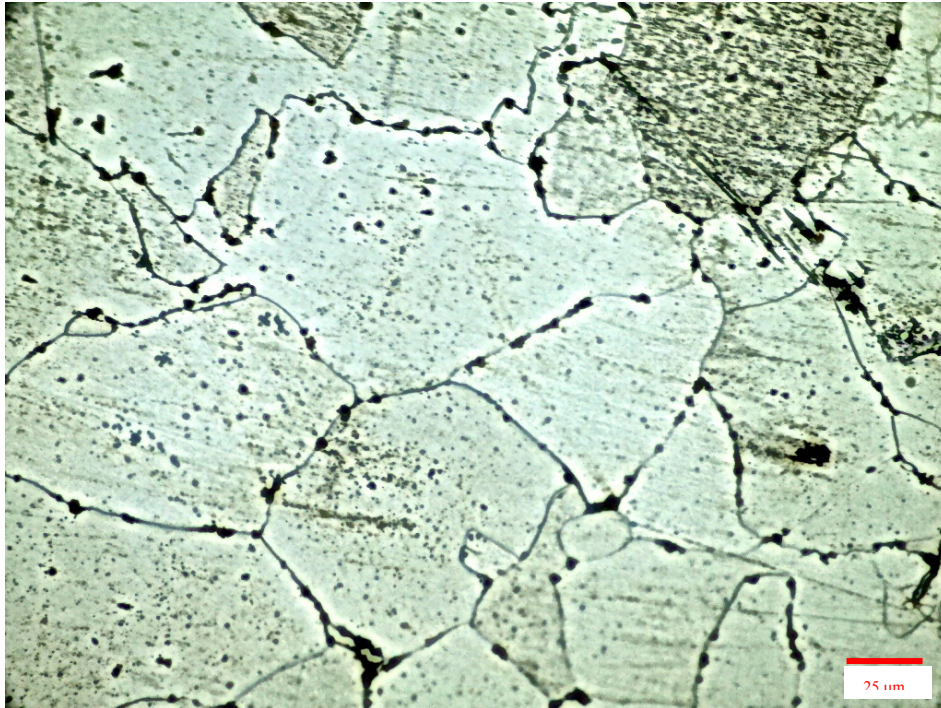
Gambar 4.14 Grafik Ukuran Butir Austenit terhadap regangan pada Temperatur Deformasi 960 °C.

4.3 Struktur Mikro Butir Ferit

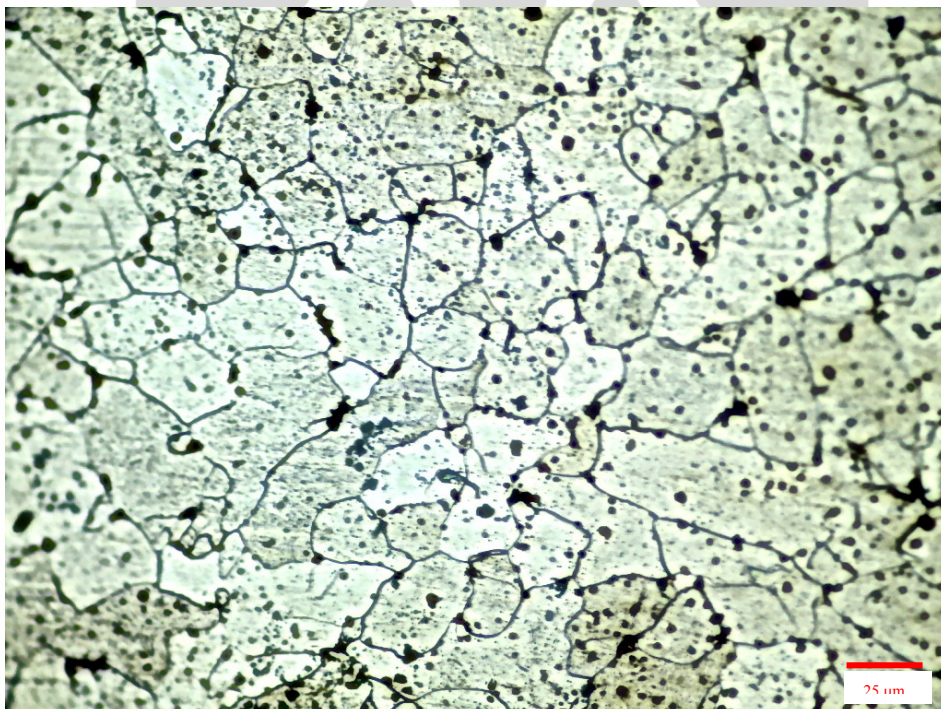
Gambar 4.15 sampai 4.27 menampilkan struktur mikro ferit hasil perlakuan panas dan deformasi panas. Struktur ferit diperoleh dengan menggunakan etsa Nital 2%. Komposisi etsa yaitu: 2 ml HNO₃ + 98 ml alkohol. Pengukuran butir menggunakan metode Intercept-Heyn berdasarkan standard E112. Perincian perhitungan dapat dilihat pada Tabel L3.2 di Lampiran 3. Dari hasil pengukuran butir ferit, terlihat besar diameter butir ferit dipengaruhi oleh besar diameter butir austenit setelah proses canai panas. Pembahasan mengenai karakteristik ferit dijelaskan pada sub bab 5.2.



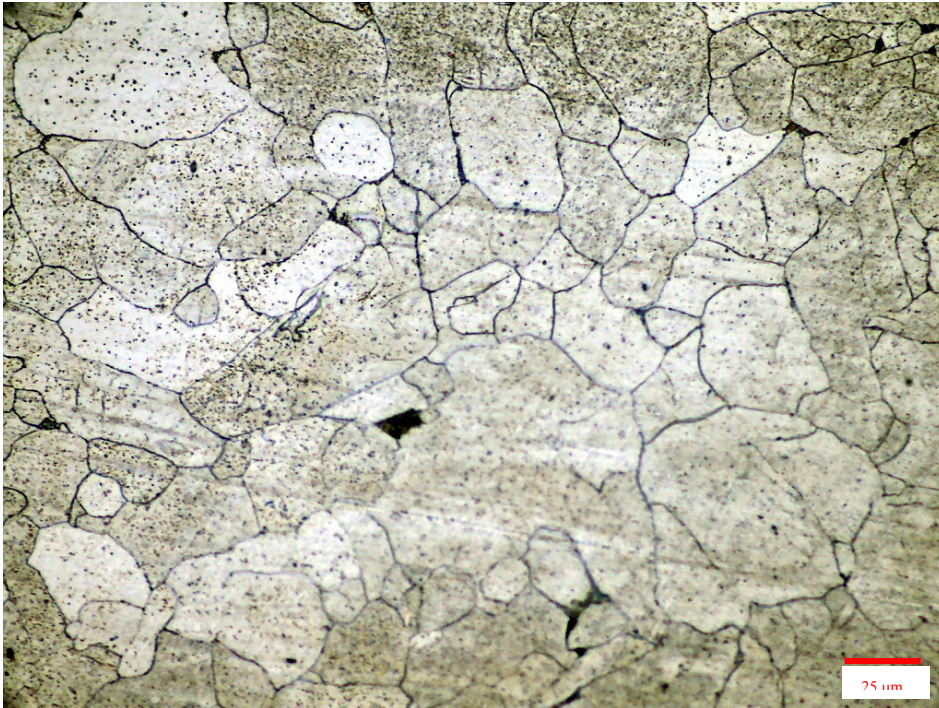
Gambar 4.15 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn tanpa deformasi pada temperatur T_1 1060 °C. (Perbesaran 500X)



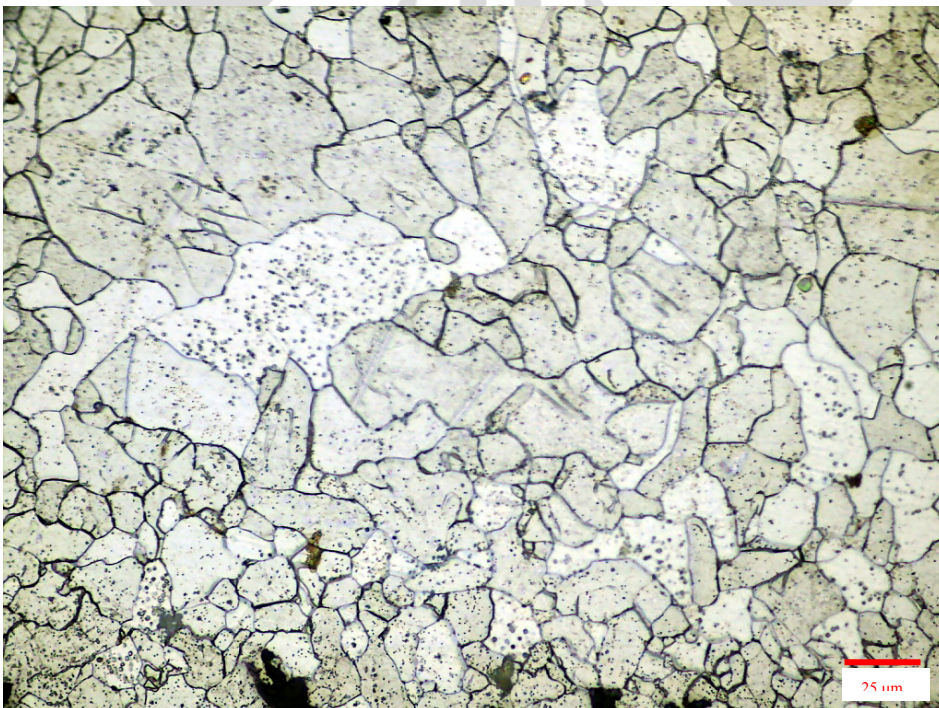
Gambar 4.16 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn tanpa deformasi pada temperatur T_1 960 °C. (Perbesaran 500X)



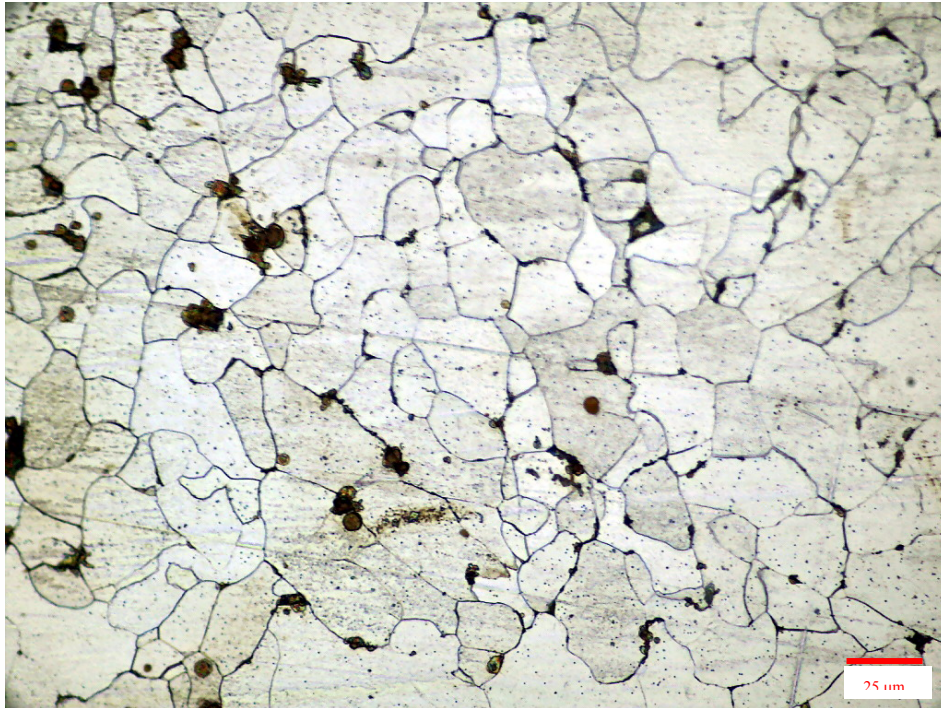
Gambar 4.17 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



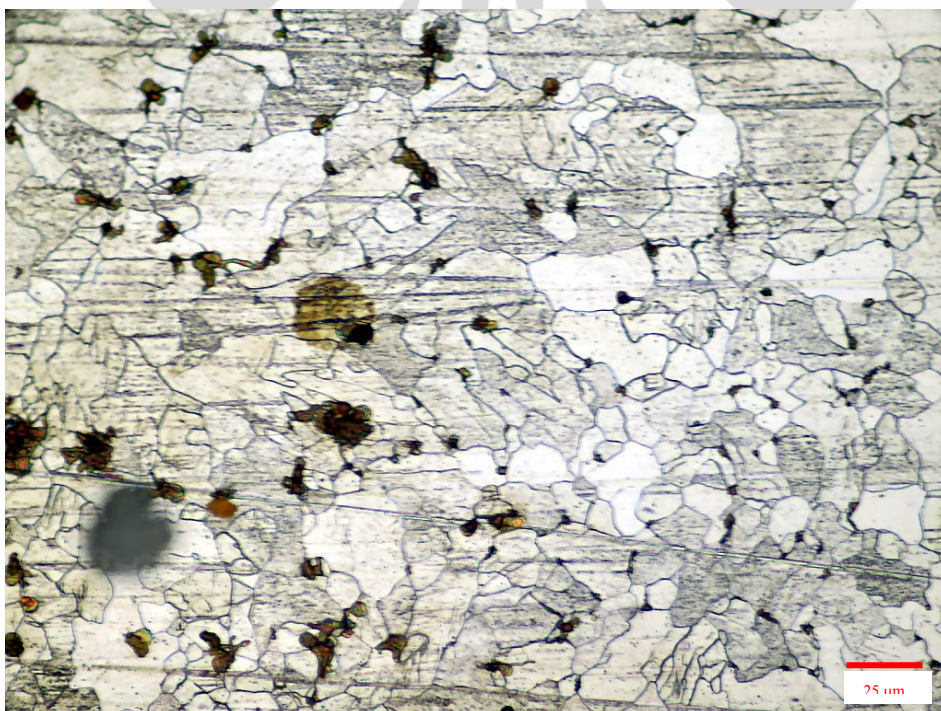
Gambar 4.18 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



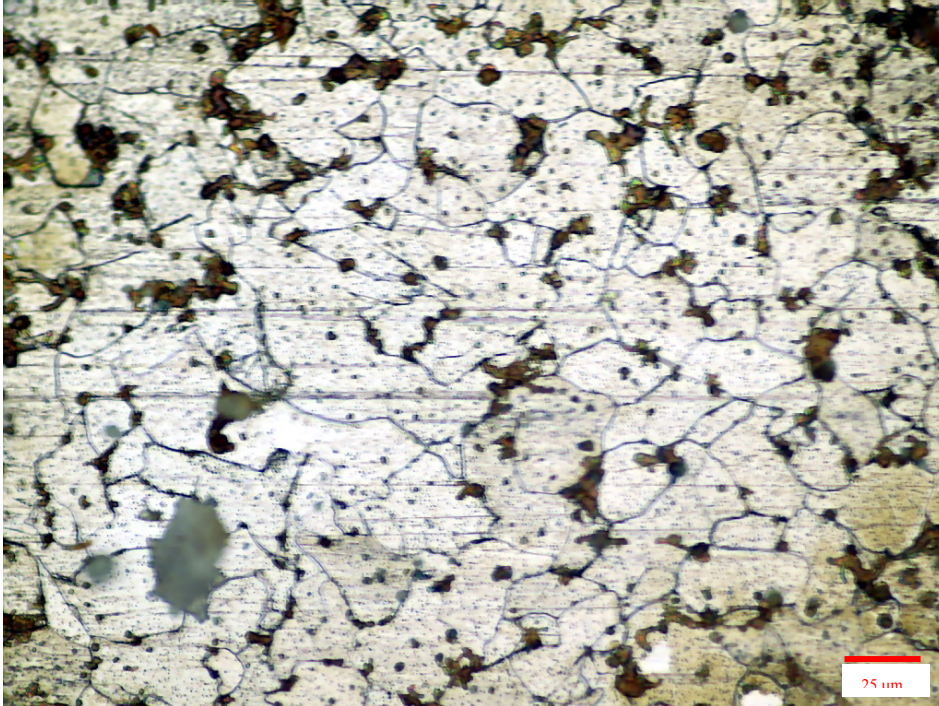
Gambar 4.19 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 10 detik. (Perbesaran 500X)



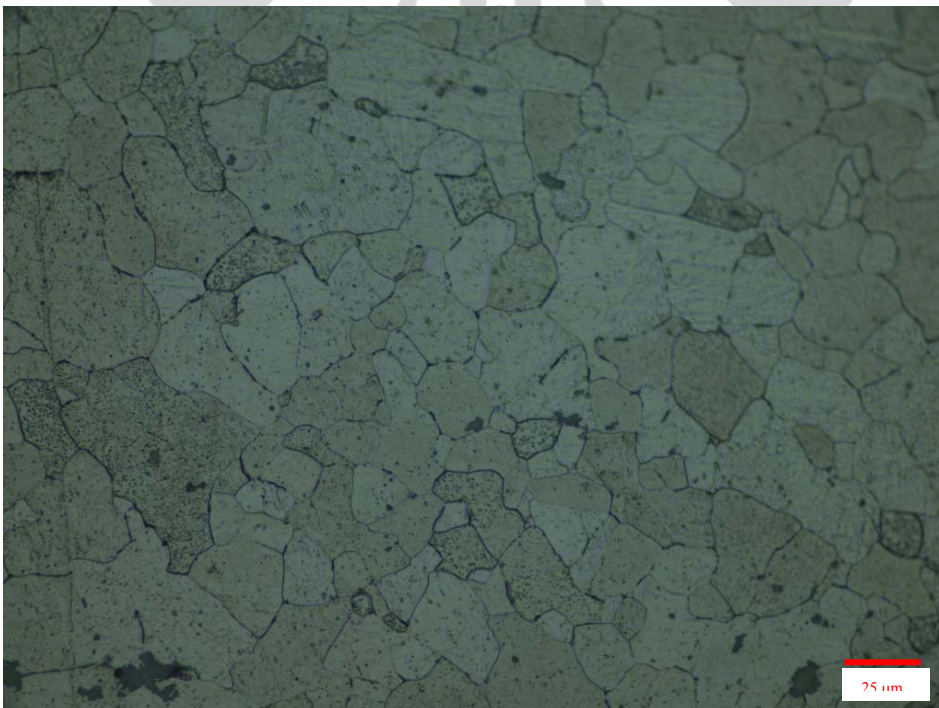
Gambar 4.20 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



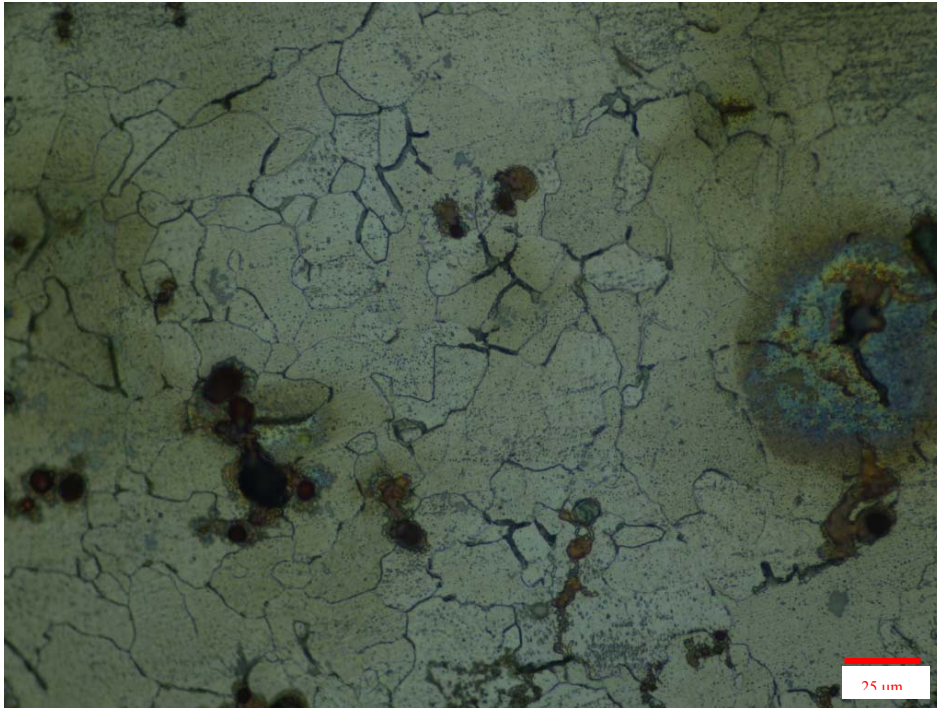
Gambar 4.21 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



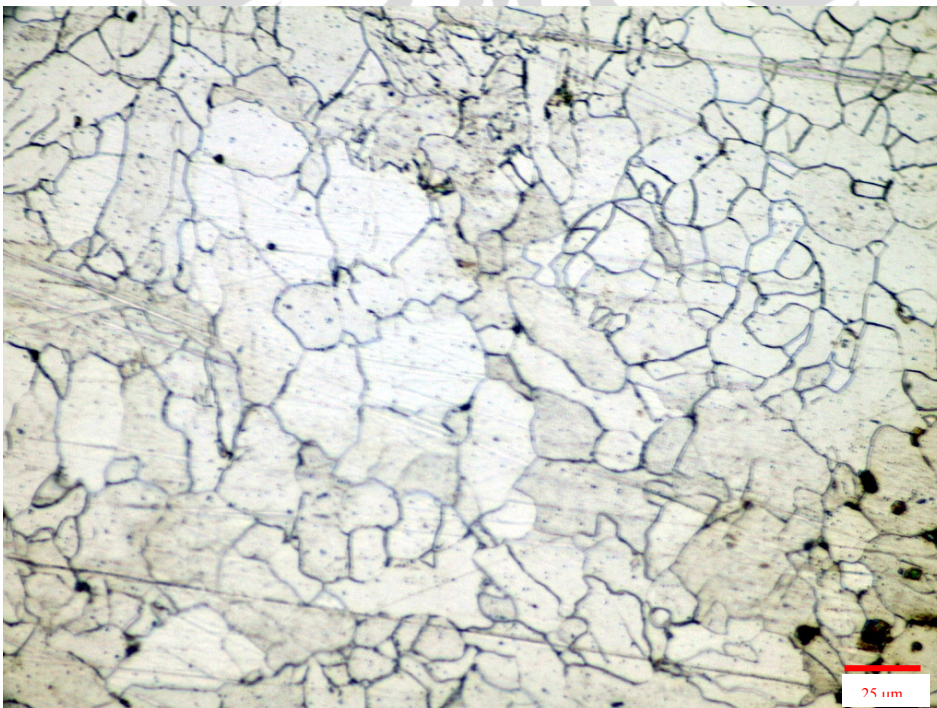
Gambar 4.22 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 10 detik. (Perbesaran 500X)



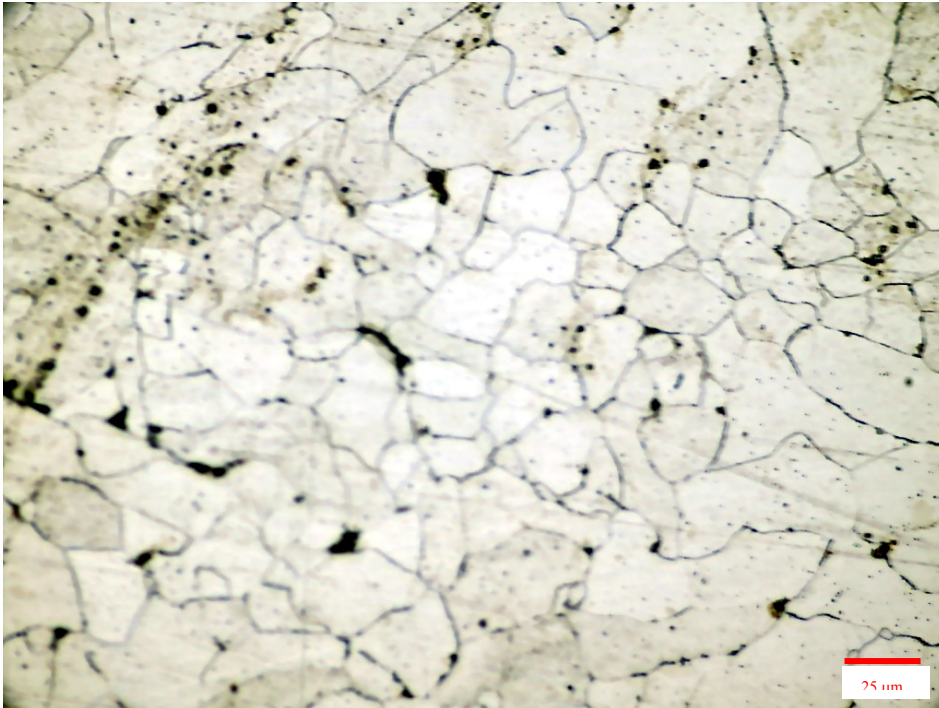
Gambar 4.23 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,5, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



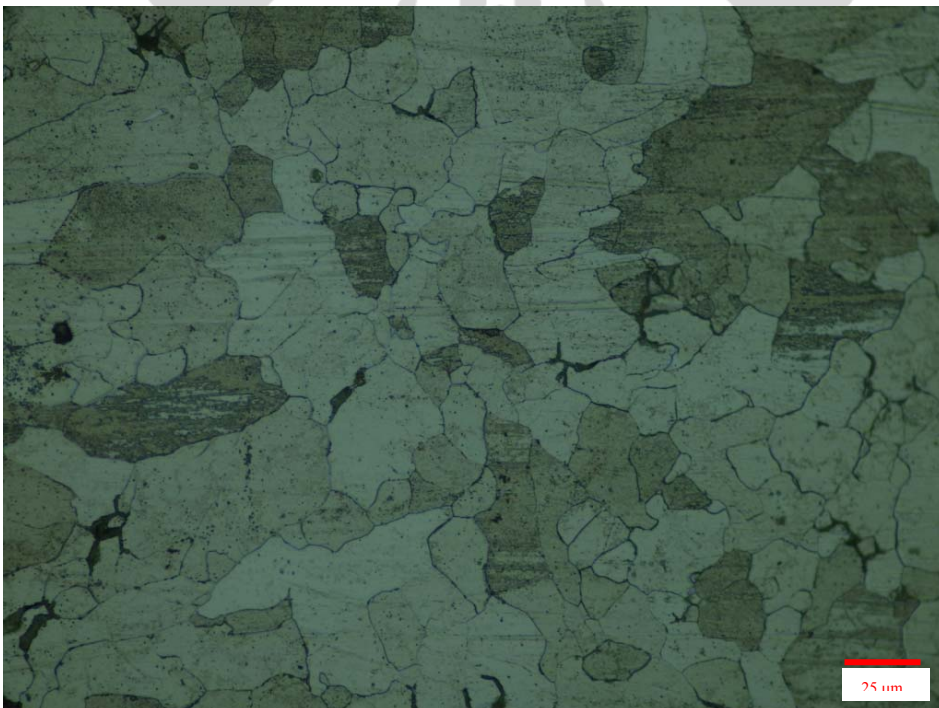
Gambar 4.24 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,5, pada temperatur T_1 1060 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.25 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.26 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,1, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 5 detik. (Perbesaran 500X)



Gambar 4.27 Struktur Mikro Butir Ferit Baja C-Mn setelah Deformasi Panas, dengan ϵ 0,2, pada temperatur T_1 960 °C dengan waktu tahan t 1 detik. (Perbesaran 500X)

4.4 Hasil pengukuran butir ferit setelah pengendalian rekristalisasi

Pertumbuhan struktur ferit pada saat pendinginan udara adalah pengamatan pada akhir proses canai panas. Ferit yang terbentuk merupakan hasil transformasi austenit pada masing-masing butir austenit pada setiap waktu tahan dimana pengendalian dilakukan dengan melakukan pendinginan cepat sebelum mencapai temperatur A_{r3} (*interrupted cooling*). Dengan adanya pengendalian tersebut diharapkan transformasi ferit diperoleh dari kondisi butir austenit yang aktual.

Perhitungan A_{r3} , menurut Sellars dan Jonas[3], didasarkan pada komposisi dari material dengan perumusan:

$$910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 80Mo + 0,35(t - 8) \quad (4.1)$$

dengan t adalah tebal sampel.

Dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 pada sub bab 3.2 maka didapat temperatur A_{r3} sekitar 859,73 °C. Hasil simulasi temperatur mendapatkan bahwa interval 10 detik adalah waktu tahan maksimum setelah deformasi pada 1060 °C dan 5 detik pada 960 °C, sebelum mencapai temperatur A_{r3} untuk menghindari terbentuknya fasa ganda. Sehingga pengendalian rekristalisasi dapat dilakukan dengan waktu tahan maksimum tersebut.

Tabel 4.2 memperlihatkan hasil pengukuran butir ferit rata-rata berdasarkan struktur mikro pada gambar 4.15 sampai 4.27 pada masing-masing deformasi dengan pengendalian rekristalisasi sesuai interval waktu tahan.

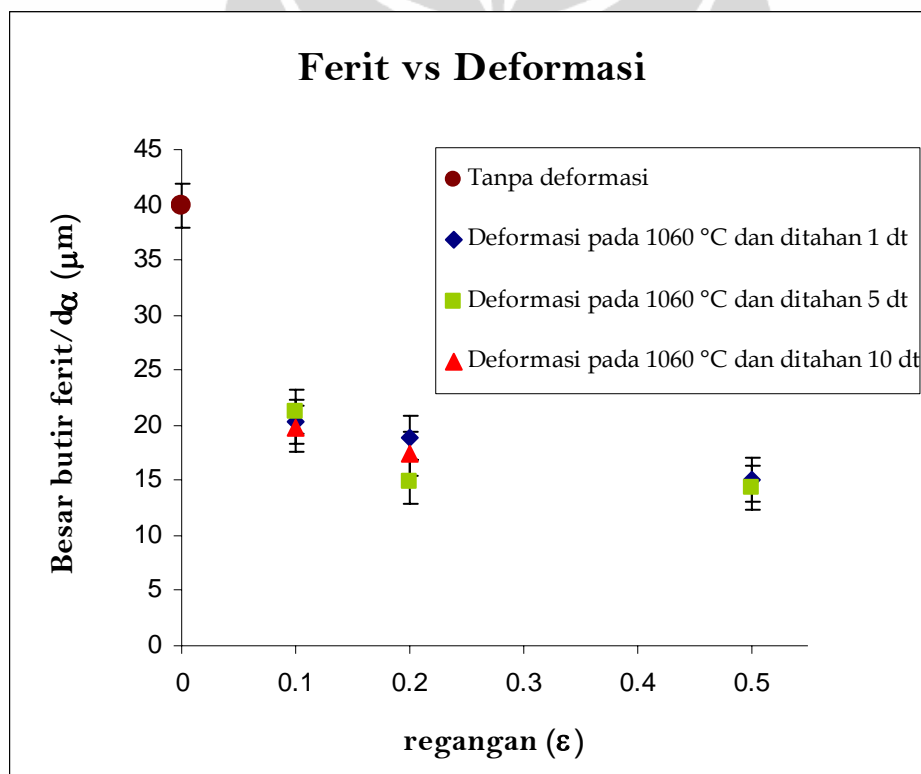
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Besar Butir Ferit ($d\alpha$) pada setiap deformasi (ϵ) dan temperatur deformasi (T_1) dengan waktu tahan (t) dengan pendinginan udara

No	T_1 (°C)	$d\alpha$ (μm)									
		ϵ	0,1			0,2			0,5		
		t	1	5	10	1	5	10	1	5	
1	1060		39,82	20,31	21,12	19,61	18,79	15,83	17,40	15,04	14,36
2	960		43,82	18,39	19,14		17,81				

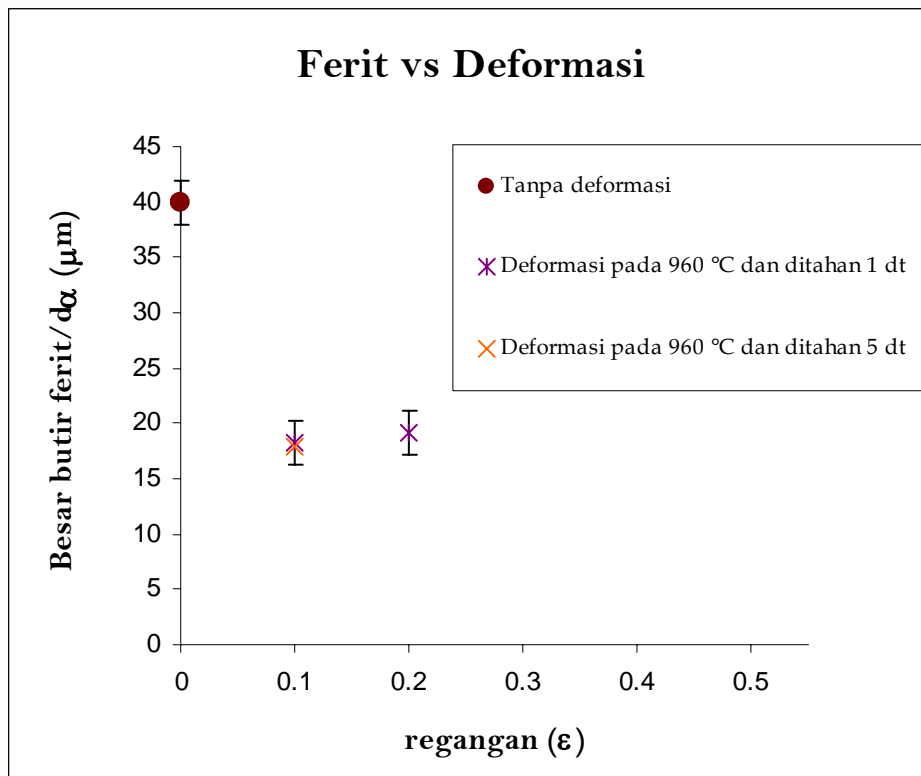
Pada temperatur deformasi 1060 °C, ukuran butir ferit hasil transformasi austenit masih mengikuti karakteristik butir austenit yang tidak seragam, dengan kecenderungan ukuran butir menjadi lebih kecil dengan meningkatnya deformasi. Ukuran butir ferit menurut interval waktu tahan rekristalisasi 1, 5, 10 detik pada regangan 0,1 berturut-turut 20,31 μm , 21,12 μm , 19,61 μm dibandingkan kondisi

tanpa deformasi 39,82 μm . Meningkatnya regangan menjadi 0,2 mendapatkan hasil yang lebih kecil walaupun tidak signifikan. Dan pada regangan 0,5, butir ferit menjadi lebih kecil lagi.

Perubahan temperatur deformasi yaitu 960 $^{\circ}\text{C}$ mendapatkan karakteristik butir ferit didapat hasil yang signifikan dimana ukuran butir tanpa deformasi cukup besar yaitu 43,82 μm , menjadi sangat kecil sebesar 18,39 μm pada regangan 0,1 untuk interval 1 detik, dan 19,14 μm untuk interval 5 detik. Dan perubahan regangan menjadi 0,2 menghasilkan butir ferit yang lebih kecil yaitu 17,81 μm Plot grafik hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.28 dan 4.29.



Gambar 4.28 Grafik Ukuran Butir Ferit terhadap regangan pada Temperatur Deformasi 1060 $^{\circ}\text{C}$.

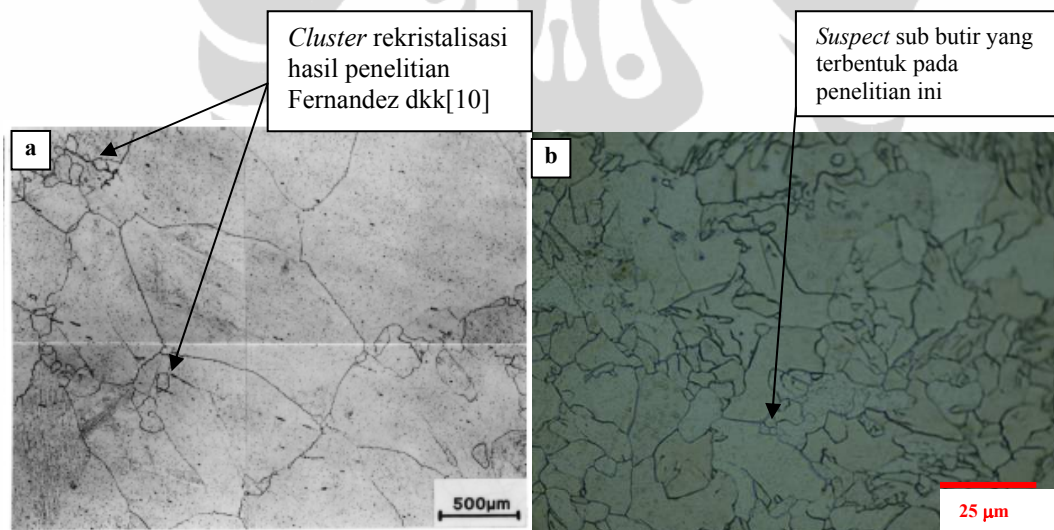


Gambar 4.29 Grafik Ukuran Butir Ferit terhadap regangan pada Temperatur Deformasi 960 °C.

BAB V PEMBAHASAN

5.1 Perubahan struktur Austenit setelah proses canai panas

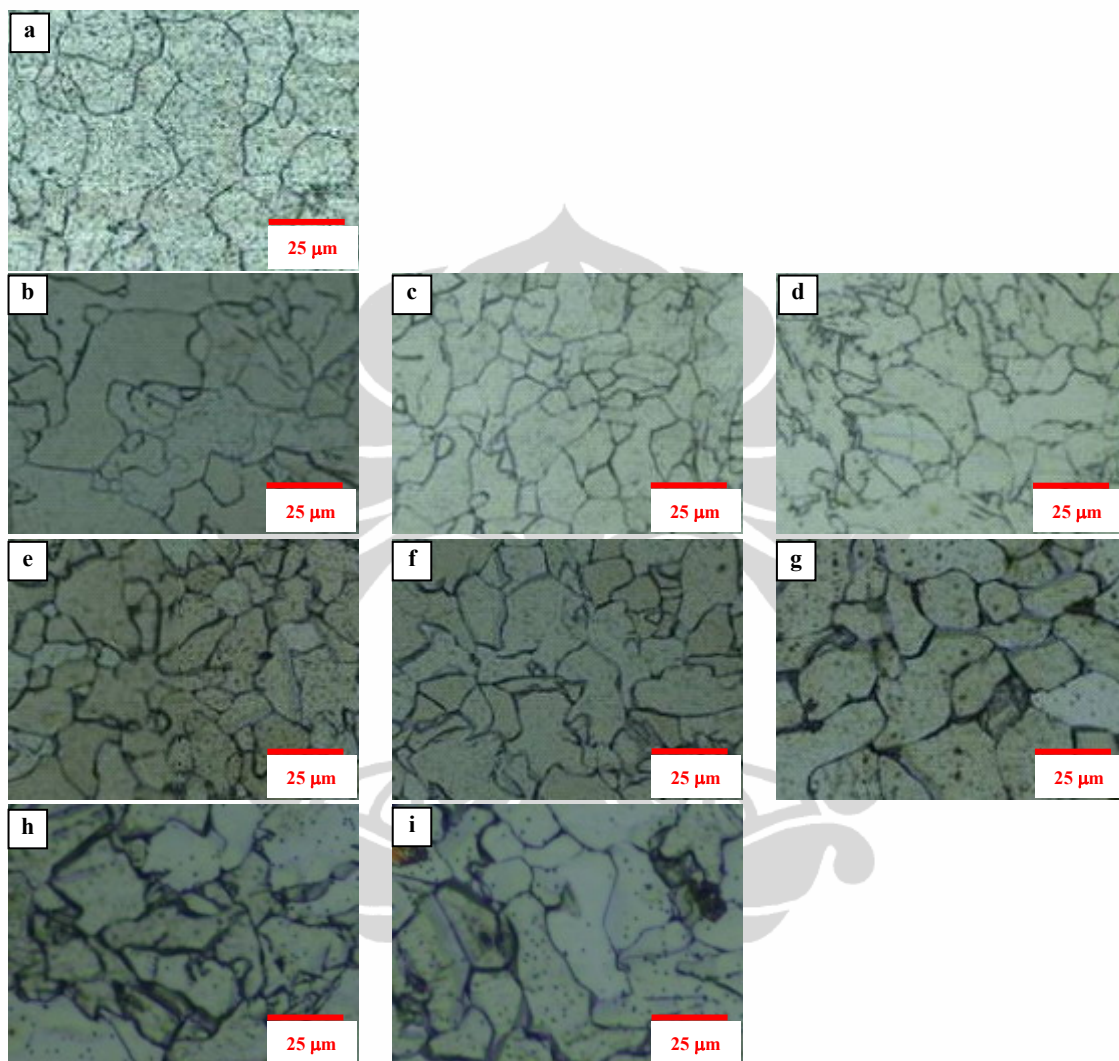
Peristiwa rekristalisasi austenit pada baja C-Mn yang diamati dari hasil penelitian memiliki karakteristik terhadap deformasi. Proses ini terjadi dalam interval waktu tahan tertentu, dimana pada semua kondisi deformasi terjadi pengecilan ukuran butir yang kemungkinan adanya pembentukan butir baru yang lebih kecil. Dalam penelitian Fernandez dkk[10], butir hasil rekristalisasi akan membentuk *cluster* pada setiap waktu tahan sehingga dapat diketahui banyaknya fraksi yang terbentuk. Namun pada penelitian ini tidak dapat dipastikan mengenai pembentukan *cluster* rekristalisasi sehingga tidak dapat dibuat perhitungan fraksi yang ada. Dapat dilihat perbandingan hasil penelitian Fernandez dkk[10] dengan penelitian ini yang menggunakan baja yang sama yaitu baja C-Mn pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Perbandingan pengamatan struktur mikro austenit setelah proses deformasi panas, (a) penelitian Fernandez dkk[10] dengan $[\epsilon]$ 0,3- $[T_1]$ 1100 °C – $[t]$ 1 detik; (b) hasil penelitian dengan $[\epsilon]$ 0,1- $[T_1]$ 1060 °C – $[t]$ 1 detik

Dengan melakukan kondisi proses yang berbeda-beda temperatur, perubahan struktur austenit akan memiliki perilaku butir yang berbeda, dimana butir austenit lebih mudah mengalami rekristalisasi pada temperatur tinggi.

Secara kuantitatif, perubahan ukuran butir austenit dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan telah dijelaskan pada bab 4. Sebagaimana terlihat pada gambar 5.2 dan 5.3 berikut, perubahan struktur austenit setelah deformasi panas pada temperatur deformasi 1060 °C ditunjukkan menurut pengamatan struktur mikro.



Gambar 5.2 Perubahan struktur austenit setelah deformasi panas T 1060 °C

Baris 1 : a) butir mula-mula (tanpa deformasi);

Baris 2 : deformasi $[\epsilon]$ 0,1- interval $[t]$: b) 1 detik; c) 5 detik; d) 10 detik;

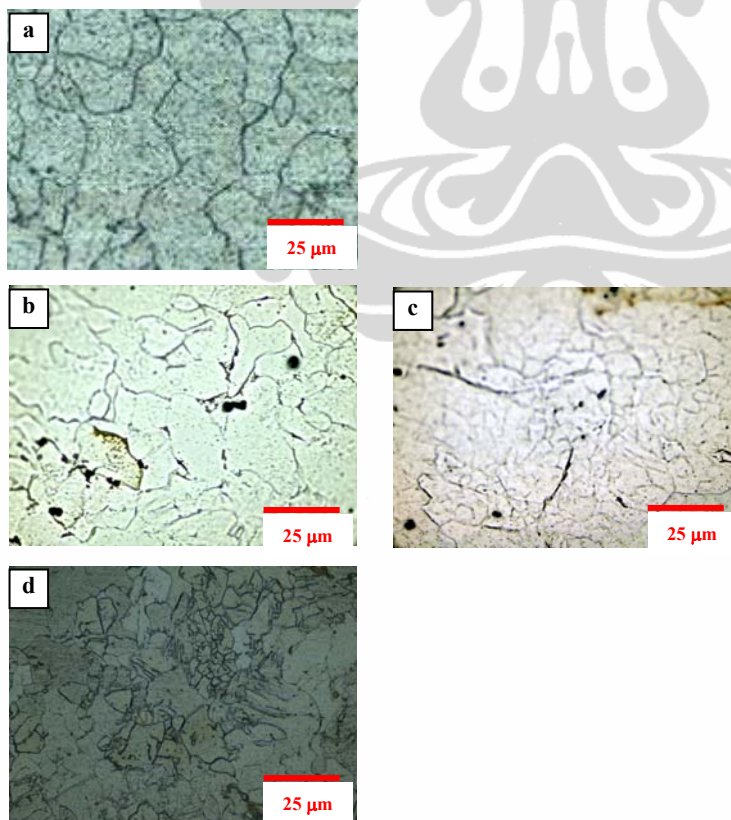
Baris 3 : deformasi $[\epsilon]$ 0,2- interval $[t]$: e) 1 detik; f) 5 detik; g) 10 detik;

Baris 4 : deformasi $[\epsilon]$ 0,5- interval $[t]$: h) 1 detik; i) 5 detik

Pada regangan 0,1, gambar 5.2.(b) hingga 5.2.(d), memperlihatkan mulai terbentuknya sub butir setelah deformasi panas yang terlihat pada interval 1 detik, dan secara tegas terlihat butir baru pada interval 5 detik. Sedangkan pada interval selanjutnya, yaitu 10 detik, butir terlihat berkembang secara parsial dimana ukuran menjadi lebih besar. Perubahan regangan menjadi 0,2, gambar 5.2.(e)

hingga 5.2.(g), tidak memperlihatkan pembentukan sub butir secara eksplisit, namun terlihat banyaknya butir dengan ukuran lebih kecil dari ukuran mula-mula pada perubahan interval 1 hingga 10 detik. Pengaruh karakteristik butir mula-mula terlihat sangat jelas pada butir hasil deformasi panas dimana banyaknya butir yang tidak seragam. Sedangkan pada regangan 0,5, gambar 5.2.(h) dan (i), terdapat pengecilan ukuran butir pada interval 1 detik dan mulai terjadi pertumbuhan butir pada interval 5 detik.

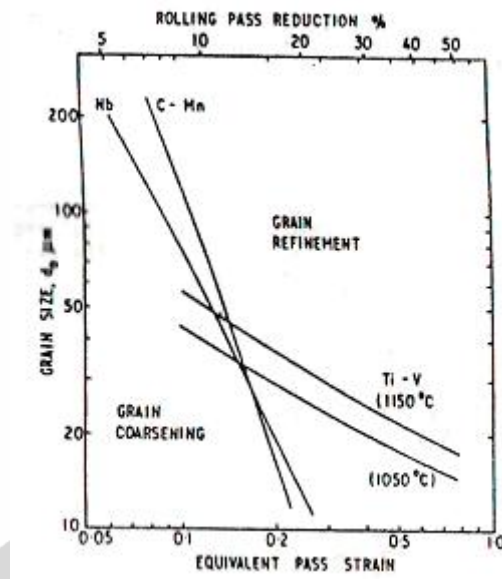
Perubahan temperatur deformasi menjadi 960 °C menunjukkan hasil yang lebih kontras, seperti ditunjukkan pada gambar 5.3. Walaupun terjadi pengecilan ukuran butir austenit, namun terbentuknya sub butir baru tidak terlihat jelas pada regangan 0,1 pada interval 1 dan 5 detik, gambar 5.3 (b) dan 5.3 (c). Sedangkan pada regangan 0,2, gambar 5.3 (d), cukup banyak butir yang mengalami pengecilan ukuran. Namun demikian, dengan karakteristik butir mula-mula yang tidak seragam, terlihat tidak semua butir mengalami pengecilan ukuran. Hal tersebut diperlihatkan secara jelas untuk deformasi pada temperatur 960 °C.



Gambar 5.3 Perubahan struktur austenit setelah deformasi panas T 960 °C
 a) butir mula-mula; b) deformasi ϵ 0,1 – t 1 detik; c) deformasi ϵ 0,1 – t 5 detik;
 d) deformasi ϵ 0,2 – t 1 detik;

Tidak beraturannya proses rekristalisasi dari hasil penelitian ini dapat dijelaskan akibat ketidakstabilan austenit setelah proses deformasi panas dimana proses rekristalisasi seperti ini lebih mudah terjadi pada temperatur lebih tinggi yaitu 1060 °C dibandingkan pada temperatur 960 °C. Penahanan rekristalisasi dengan penurunan temperatur secara non-isothermal agaknya juga memberikan pengaruh terhadap proses rekristalisasi austenit. Dalam hal ini butir austenit kurang mendapatkan *driving force* akibat penurunan temperatur dimana pembentukan nukleus-nukleus baru tidak optimal. Menurut Fernandez dkk[10], hal itu disebabkan tidak meratanya distribusi energi setelah deformasi yang mana pembentukan sub butir dengan bentuk cluster mempercepat terjadinya tumbukan (*impingement*). Pada akhirnya proses rekristalisasi langsung diikuti dengan pertumbuhan (pengkasaran) butir austenit yang menjadi karakteristik butir austenit akhir. Sehingga dengan turunnya temperatur, diperkirakan nukleasi baru tidak terbentuk, dan butir yang ada mengalami pertumbuhan.

Dalam melihat hubungan deformasi dengan pembentukan butir austenit akhir, pengamatan terhadap karakteristik ukuran butir austenit mula-mula menjadi sangat penting dimana dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap proses rekristalisasi. Menurut Djaic dan Jonas [1], proses rekristalisasi sangat tergantung dari karakteristik butir austenit mula-mula, dimana setiap ukuran butir austenit mula-mula memiliki regangan kritis yang berbeda-beda untuk mencapai proses rekristalisasi. Namun deformasi kecil ternyata juga dapat menahan proses rekristalisasi menjadi lebih lama dimana hasil yang didapat tidak signifikan.[11] Dalam hal ini Sellars[12] telah memplot hubungan ukuran butir austenit pada baja C-Mn terhadap regangan kritis yang diperlukan untuk mengalami rekristalisasi pada gambar 5.4.

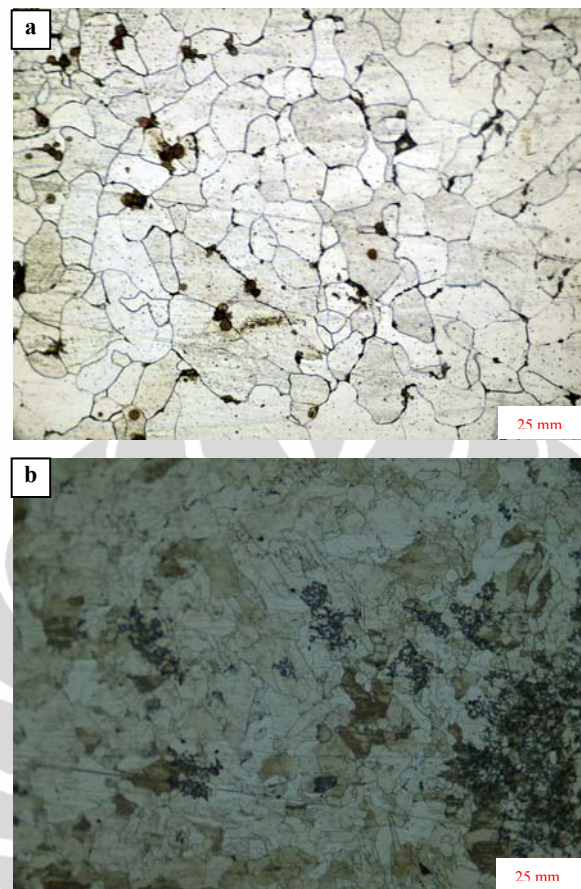


Gambar 5.4 Regangan Kritis yang diperlukan untuk terjadinya rekristalisasi terhadap ukuran butir austenit mula-mula pada beberapa jenis baja. [12]

5.2 Pembentukan Ferit setelah pengendalian struktur austenit

Proses transformasi ferit pada baja diawali dengan nukleasi ferit menurut difusi karbon. Energi bebas ΔG , selama proses transformasi sangat dipengaruhi oleh kadar karbon dan juga pendinginan. Dengan kandungan karbon 0,03%, reaksi umumnya berjalan lambat, proses nukleasi ferit hanya terjadi pada tempat-tempat tertentu saja pada butir. Dengan adanya deformasi dapat meningkatkan energi bebas sehingga reaksi berjalan lebih cepat, dalam hal ini meningkatkan laju nukleasi ferit.

Dari hasil penelitian, pada temperatur tinggi 1060 °C, struktur ferit setelah deformasi panas masih mengikuti karakteristik butir mula-mula austenit, dimana butir tidak seragam (non-equiaxed). Struktur ferit masih berbentuk allotriomorf pada interval 1 detik yaitu awal pembentukan nukleus austenit, dimana terdapat rentang yang cukup jauh dengan temperatur A_{r3} . Selanjutnya struktur cenderung membentuk pelat ketika mendekati A_{r3} yaitu interval 5 dan 10 detik. Peningkatan regangan juga menjadikan struktur ferit berbentuk pelat, dan menjadi circular pada regangan 0,5. Perbandingan struktur allotriomorf dan pelat ditunjukkan pada gambar 5.5.



Gambar 5.5 Perbandingan struktur ferit hasil deformasi panas pada temperatur T_1 dengan ϵ (a) 0,1 dan (b) 0,5

Butir ferit hasil canai panas berasal dari butir austenit yang mengalami rekristalisasi parsial sebagaimana dijelaskan pada sub bab 5.1. Akibatnya butir ferit yang tumbuh berasal dari gabungan antara butir austenit hasil rekristalisasi dan sisa terdeformasi. Menurut Sellars[12] dan Roberts dkk[13], luas permukaan butir yang lebih besar memiliki banyak tempat nukleasi sesuai prinsip pertumbuhan ferit. Adanya pengendalian struktur austenit sebelum proses transformasi memungkinkan percepatan undercooling. Batas butir dan sisi butir menjadi tempat paling potensial untuk terjadinya nukleasi ferit.

Ukuran butir juga memiliki pengaruh terhadap proses transformasi ferit dari austenit. Dapat dilihat dari hasil penelitian bahwa, dari butir austenit hasil proses deformasi panas pada temperatur lebih rendah, 960 °C, dimana struktur

austenit sebagian masih dalam ukuran seperti mula-mula, struktur ferit lebih cenderung membentuk pelat Widmanstatten. Hal yang sama juga terlihat pada penambahan deformasi, regangan besar ϵ 0,5. Penjelasan mengenai hal ini adalah bahwa pada butir kecil, nukleasi terjadi lebih cepat, sehingga permukaan dan sisi butir menjadi tempat potensial terjadinya nukleasi ferit dan nukleasi terjadi di atas temperatur Widmanstatten (T_w). [7] Sedangkan pada butir besar nukleasi terjadi lebih lambat, tempat potensial berada pada batas butir sehingga struktur ferit berbentuk pelat Widmanstatten dan acicular. Pembahasan mengenai laju nukleasi dijabarkan pada sub bab berikutnya.

5.3 Perhitungan Laju Nukleasi Ferit

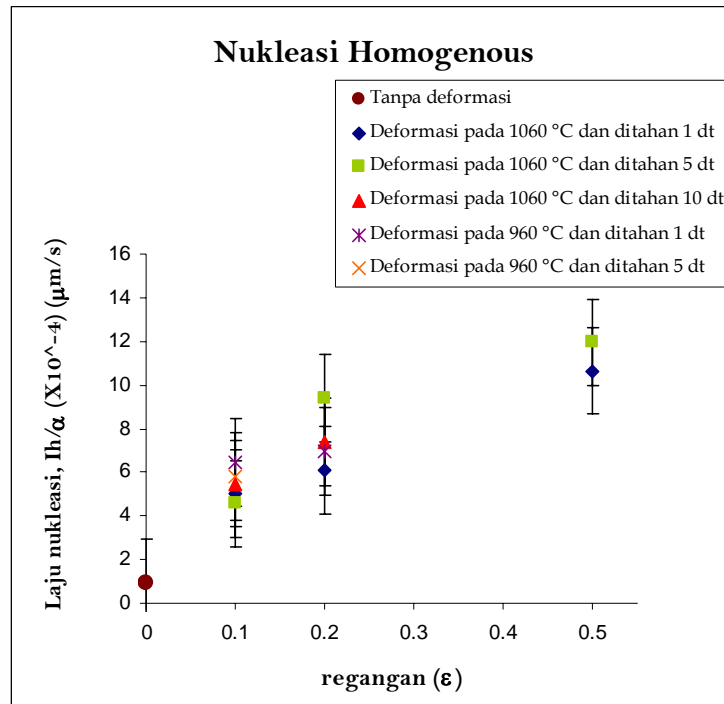
Dari perhitungan rasio transformasi butir austenit terhadap butir ferit, $d\gamma/d\alpha$, diketahui bahwa pada kondisi tanpa deformasi dihasilkan laju nukleasi yang “sangat kecil” dibandingkan dengan deformasi, baik nukleasi homogenous (I_h/α) maupun heterogenous (I_s/α). Tabel 5.1 berikut ini menggambarkan hasil perhitungan laju nukleasi berdasarkan persamaan (2.10) dan (2.11) dari masing-masing regangan (ϵ) pada setiap interval waktu tahan (t). Dapat dilihat perbandingan nilai I_h/α pada deformasi 0 sebesar $0,93 \times 10^{-4} \mu\text{m/s}$ dan pada T_1 1060 °C, dengan regangan 0,1, dan waktu tahan 1 detik sebesar $5,02 \times 10^{-4} \mu\text{m/s}$. Dan untuk setiap waktu tahan mendapatkan perubahan yang signifikan namun cukup untuk menjelaskan tentang mekanisme nukleasi yang ada. Peningkatan regangan juga menunjukkan peningkatan nilai laju nukleasi dan terlihat signifikan pada regangan besar, 0,5. Hal ini menjelaskan bahwa nukleasi ferit ternyata dipengaruhi oleh regangan. Plot dari hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada gambar 5.6 dan 5.7. (Perincian perhitungan rasio transformasi dan laju nukleasi dapat dilihat pada Lampiran 2.C)

Dari Tabel 5.1 juga memperlihatkan bahwa nukleasi heterogenous lebih dominan dibandingkan nukleasi homogenous pada setiap deformasi. Hal ini menunjukkan batas butir merupakan tempat paling potensial terjadinya nukleasi ferit. Selain itu, diperkirakan karena butir yang lebih kecil mempunyai jumlah batas butir per unit volume yang lebih luas dibandingkan butir besar, sehingga nukleasi dapat terjadi di banyak tempat.

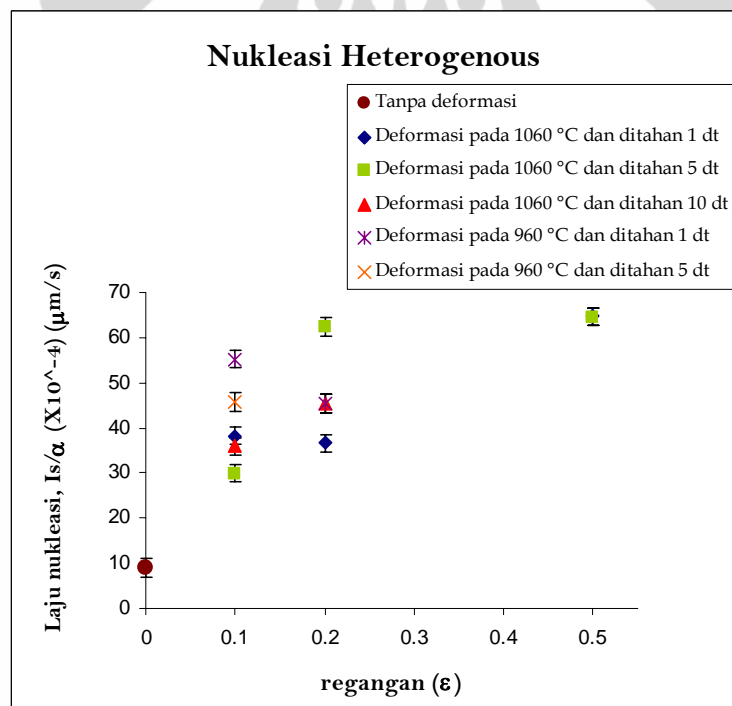
Tabel 5.1 Hasil Perhitungan Laju Nukleasi Ferit pada setiap deformasi (ϵ) dan temperatur deformasi (T_1) dengan waktu tahan (t)

No	T (°C)	I_h/α ($\times 10^{-4}$) $\mu\text{m/s}$											
		ϵ	0			0,1			0,2			0,5	
		t		1	5	10	1	5	10	1	5		
1	1060		0.93	5.02	4.56	5.48	6.10	9.37	7.39	10.65	11.95		
2	960		0.73	6.44	5.83		6.98						
No	T (°C)	I_s/α ($\times 10^{-4}$) $\mu\text{m/s}$											
		ϵ	0			0,1			0,2			0,5	
		t		1	5	10	1	5	10	1	5		
1	1060		9.07	38.22	29.93	35.92	36.59	62.35	45.32	64.65	64.59		
2	960		6.81	55.25	45.80		45.35						

Sedangkan perubahan temperatur menunjukkan perubahan yang signifikan pada nukleasi heterogen, namun tidak terlihat pada nukleasi homogen. Menurut Umemoto dkk[2], pada kondisi tanpa deformasi, batas butir merupakan tempat nukleasi dominan. Sedangkan pada kondisi deformasi, laju nukleasi di batas butir dipercepat dan nukleasi juga terjadi pada butir kembar, pita deformasi dan di dalam matriks. Laju nukleasi sebanding dengan kuadrat jumlah butir ferit per satuan luas permukaan butir austenit. Pada penelitian ini dengan menggunakan baja C-Mn, sesuai dengan hasil pengamatan struktur austenit, terjadinya rekristalisasi parsial selama proses canai panas memungkinkan terjadinya percepatan nukleasi pada temperatur lebih rendah akibat tertahannya rekristalisasi, walaupun tidak mengandung unsur penahan rekristalisasi seperti Ti pada baja HSLA. Dengan mempercepat undercooling, yaitu pendinginan celup sampai temperatur transformasi Ar_3 , dapat mengoptimalkan proses nukleasi di batas butir. Dan terlihat dari hasil penelitian, adanya perubahan yang signifikan pada temperatur deformasi lebih rendah, 960 °C. Dan kesimpulan yang dapat diperoleh dari perhitungan ini bahwa laju nukleasi homogen dan heterogen mempunyai kecenderungan yang sama terhadap deformasi, dan semua itu bergantung dari temperatur deformasi.



Gambar 5.6 Grafik hubungan antara laju nukleasi homogenous, I_h/α terhadap deformasi [ϵ] dalam waktu tahan tertentu [t] pada T_1 1060 dan 960 °C



Gambar 5.7 Grafik hubungan antara laju nukleasi heterogenous, I_s/α terhadap deformasi [ϵ] dalam waktu tahan tertentu [t] pada T_1 1060 dan 960 °C