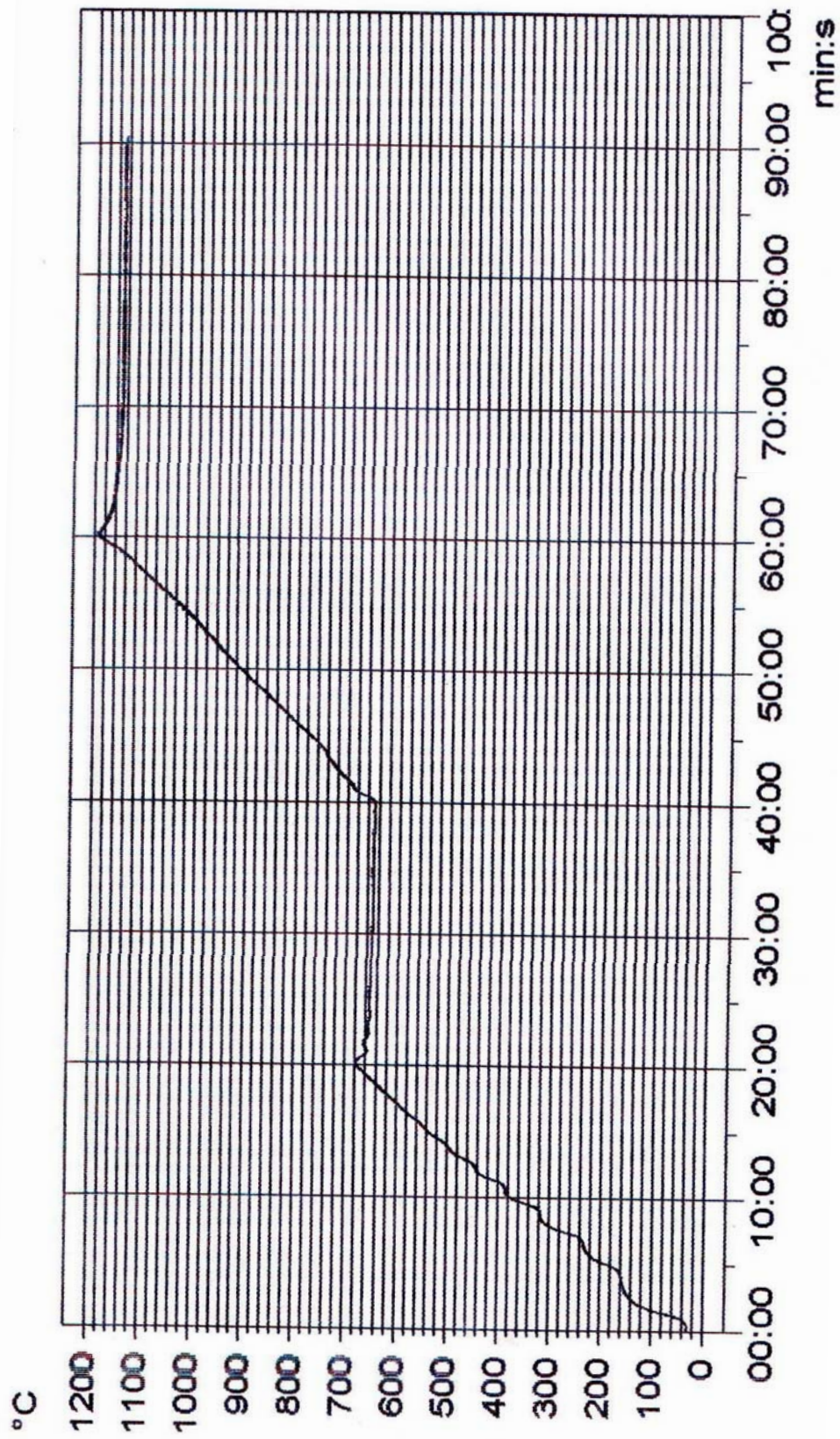
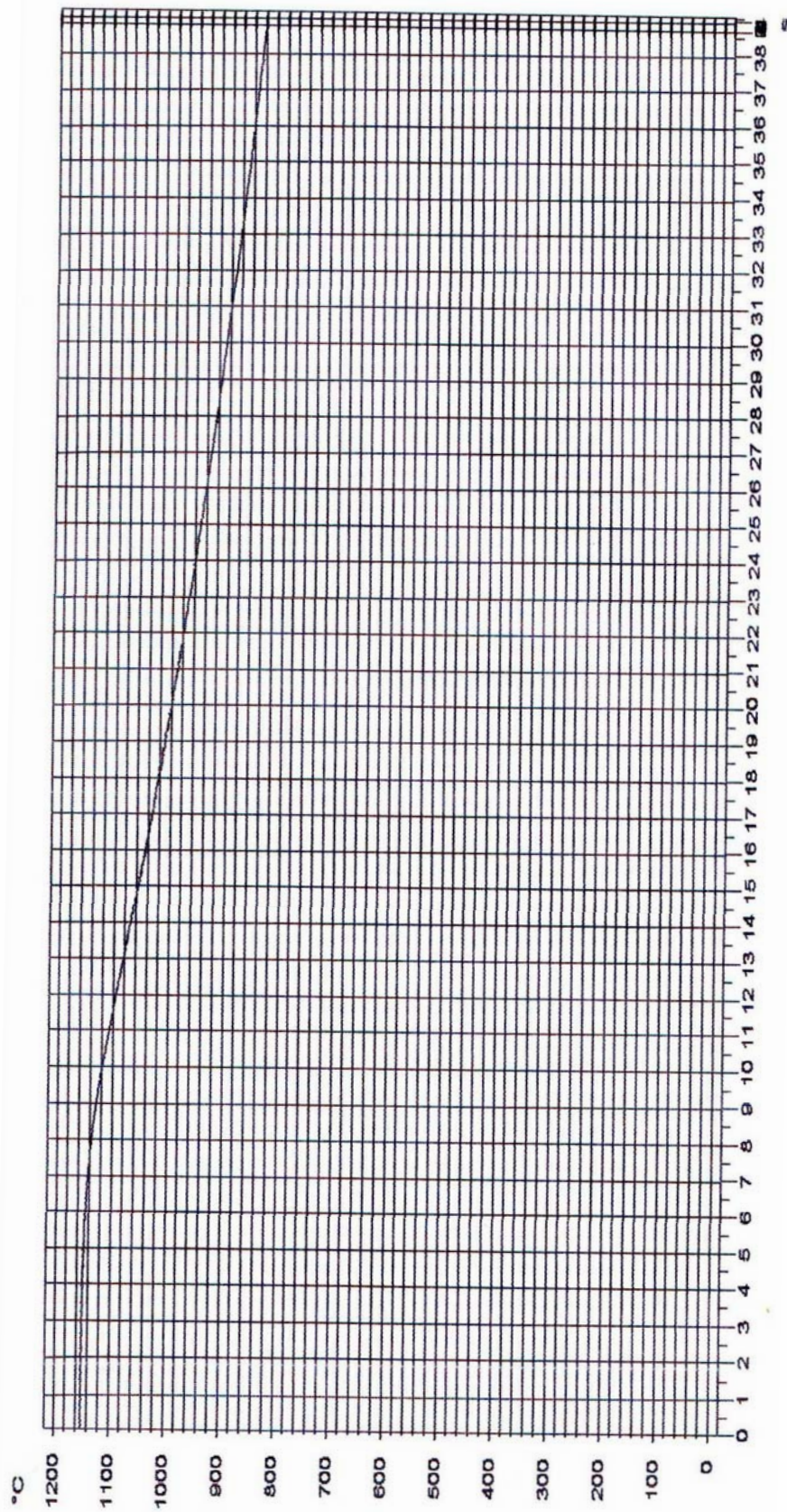


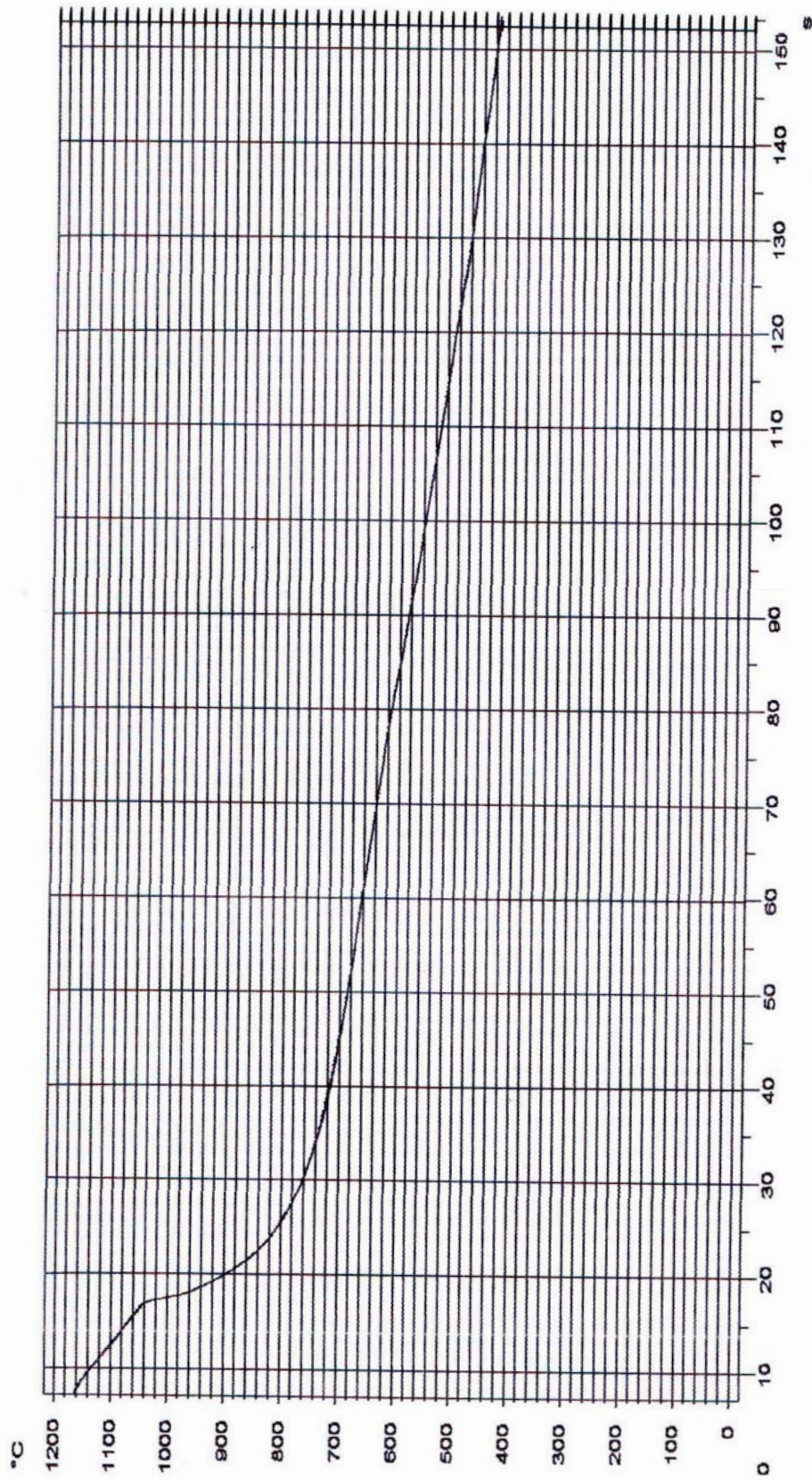
Lampiran 1: DATA THERMAL HISTORY



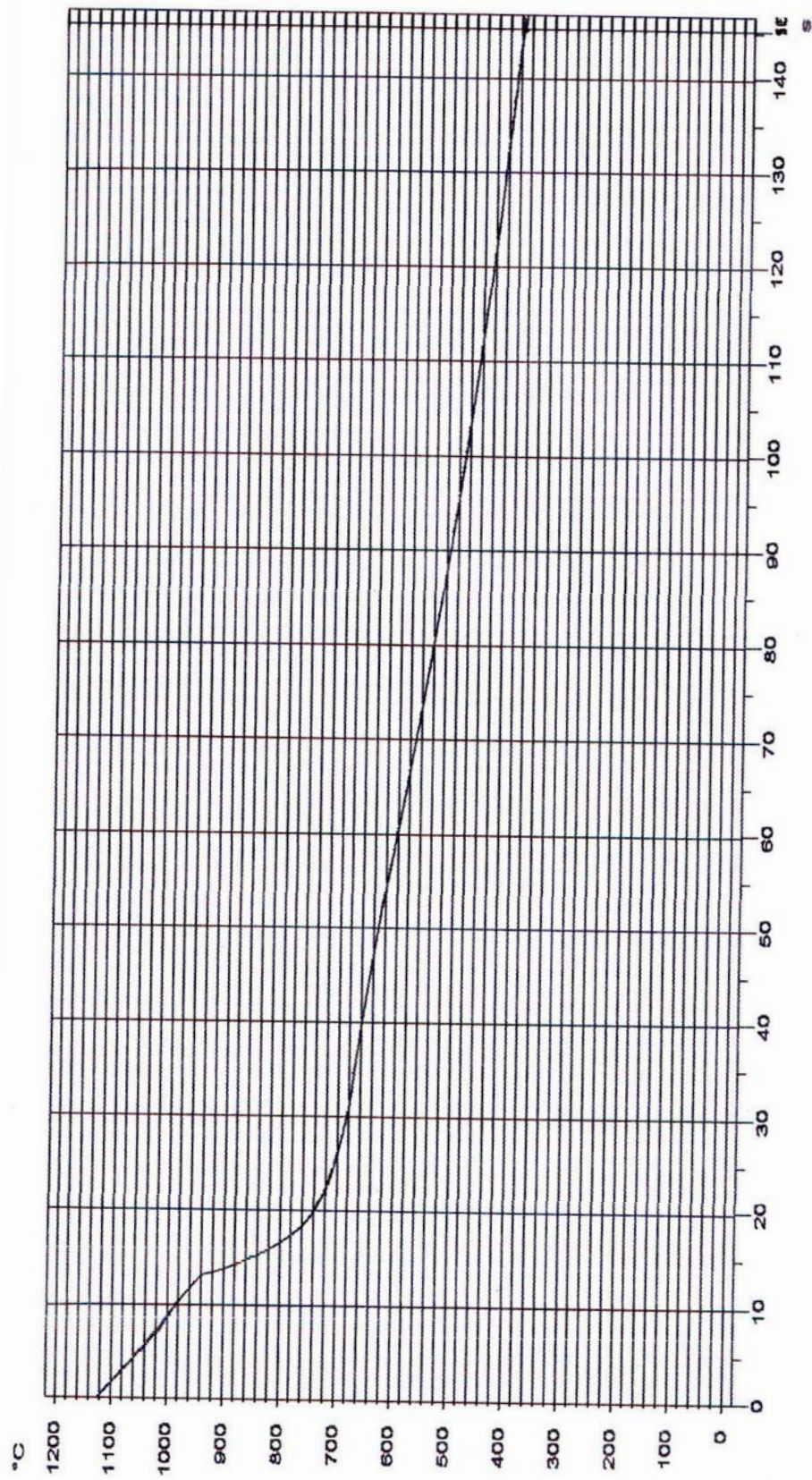
Gambar L.1.1 Profil Temperatur selama pemanasan ulang sebelum proses canai panas



Gambar L.1.2 Profil Temperatur selama pendinginan udara setelah proses canai panas



Gambar L.1.3 Profil Temperatur pada  $T_1$  1060 °C dengan pendinginan terputus dilanjutkan pendinginan udara setelah proses canai panas



Gambar L.1.4 Profil Temperatur pada  $T_1$  960 °C dengan pendinginan terputus dilanjutkan pendinginan udara setelah proses canai panas

## Lampiran 2: PERHITUNGAN-PERHITUNGAN

### A. Perhitungan Mekanis Canai Panas

Laju regangan  $\dot{\epsilon}$  dengan perumusan:  $\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{L_p/v}$  digunakan dalam perhitungan

butir rekristalisasi, dimana:

$$L_p = \sqrt{R\Delta h}.$$

( $L_p$  adalah *arc length of contact*)

Diketahui:

$R$ (radius Roll) : 52 mm

$v$ (Kecepatan Roll) : 8 m/menit=133,33 mm/detik

$h_0$ (Tebal sampel awal): 5,7 mm

Sebagai contoh, pada regangan  $\epsilon$  0,1 didapat:

$$\begin{aligned}\Delta h &= (1 - \text{EXP}(\epsilon)) \cdot (h_0) \\ &= (1 - \text{EXP}(0,1)) \cdot (5,7) \\ &= 0,54 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}L_p &= \sqrt{(52 \cdot 0,54)} \\ &= 5,31 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \frac{0,1}{\frac{5,31}{133,33}} \\ &= 2,51 \text{ /detik}\end{aligned}$$

Hasil perhitungan laju regangan secara lengkap dapat dilihat pada tabel L2.1.

### B. Perhitungan Rekristalisasi

Fraksi rekristalisasi yang terbentuk setelah deformasi panas dihitung berdasarkan waktu rekristalisasi. Dalam perumusan Yada,  $t_{0,95}$  -waktu untuk tercapainya 95% fraksi- dapat dihitung berdasarkan  $t_{0,5}$  yang ditentukan oleh besaran  $S_V$  yang tergantung dari ukuran butir awal,  $d_0$ , dimana:

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

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

$$X_{st} = 1 - \text{EXP} \left[ -0,693 \times \left( \frac{t - t_0}{t_{0,5}} \right)^2 \right]$$

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

Sebagai contoh, sesuai persamaan Yada, untuk regangan  $\epsilon$  0,1 pada temperatur  $T$  960 °C(1233 K), dan  $d_0$  45,7  $\mu\text{m}$ , maka:

$$S_V = \left( \frac{24}{\pi} \times 156,96 \right) \times (0,49e^{0,1} \times 0,155e^{-0,1} \times 0,1433e^{-3(0,1)})$$

$$= 0,038$$

$$t_{0,5} = 2,2 \cdot 10^{-12} \times 0,038^{-0,5} \times 2,51^{-0,2} \times \text{EXP}(30000/1233)$$

$$= 18,59 \text{ detik}$$

$$t = \sqrt{\left( \frac{\ln(1 - 0,95)}{-0,693} \right)} \times 34,46$$

$$= 38,66 \text{ detik}$$

Jadi waktu yang diperlukan untuk terjadinya 95% rekrsitalisasi pada temperatur 960 °C dengan regangan 0,1 adalah 38,66 detik. Hasil lengkap perhitungan waktu rekristalisasi dapat dilihat pada tabel L2.1. Sedangkan untuk perhitungan besar butir rekristalisasi dapat dilihat pada tabel L2.2.

Tabel L2.1 Perhitungan Rekristalisasi

$\epsilon$ , %R	$\Delta h$	T (C)	T(K)	X	Lp	$\dot{\epsilon}$	t0,5	t0.95	
$\epsilon=0,1$	0.54	1060	1333	95%	5.31095	2.5105	2.997	6.232	s
9.52%	0.54	960	1233	95%	5.31095	2.5105	18.596	38.664	s
$\epsilon=0,2$	1.03	1060	1333	95%	7.329953	3.6380	0.689	1.432	s
18.13%	1.03	960	1233	95%	7.329953	3.6380	4.273	8.885	s
$\epsilon=0,3$	1.48	1060	1333	95%	8.764786	4.5637	0.287	0.597	s
25.92%	1.48	960	1233	95%	8.764786	4.5637	1.782	3.704	s
$\epsilon=0,4$	1.88	1060	1333	95%	9.885198	5.3953	0.152	0.317	s
32.97%	1.88	960	1233	95%	9.885198	5.3953	0.945	1.964	s
$\epsilon=0,5$	2.24	1060	1333	95%	10.79927	6.1733	0.092	0.191	s
39.35%	2.24	960	1233	95%	10.79927	6.1733	0.571	1.187	s

Tabel L2.2 Perhitungan Besar Butir Rekrystalisasi

$\varepsilon$	1060			960		
	$d_0$	$S_v$	$d_{rek}$	$d_0$	$S_v$	$d_{rek}$
0.1	45.7	0.132	67.172	45.7	0.132	67.172
0.2	45.7	0.134	43.782	45.7	0.134	43.782
0.3	45.7	0.140	33.570	45.7	0.140	33.570
0.4	45.7	0.147	27.399	45.7	0.147	27.399
0.5	45.7	0.156	23.096	45.7	0.156	23.096

### C. Perhitungan Laju Nukleasi butir ferit berdasarkan rasio transformasi

Laju nukleasi ditentukan oleh jenis nukleasi butir ferit, baik dari dalam matriks (homogenous), pada permukaan butir dan sisi butir. Karena karakteristik butir austenit mempengaruhi jenis nukleasi yang terjadi dimana kemungkinan kedua jenis tersebut terjadi. Sebagai contoh perhitungan adalah dari butir austenit dengan kondisi tanpa deformasi dan deformasi 0,2. Secara umum rasio transformasi  $d\gamma/d\alpha$  dapat ditulis sebagai berikut:

$$d\gamma/d\alpha = 1,0227 \left( I_h/\alpha \right)^{2/5} d\gamma \quad \text{dan} \quad d\gamma/d\alpha = \left( 2/\pi \right)^{1/6} \left( I_s/\alpha \right)^{2/5} d\gamma^{2/3}$$

Diketahui:

- Pada kondisi tanpa deformasi,  $T_1$  1060 °C
  - $d\gamma = 45,7$  mm
  - $d\alpha = 39,82$  mm
  - $45,7/39,82 = 1,0277 \cdot (I_h/\alpha)^{2/5} \cdot (45,7)$
  - $1,14766 = 46,9659 \cdot (I_h/\alpha)^{2/5}$
  - $(I_h/\alpha)^{2/5} = 0,2444$
  - $I_h/\alpha = (0,2444)^{5/2} = 9,33 \cdot 10^{-5}$
- Pada kondisi deformasi  $\varepsilon$  0,2,  $T_1$  1060 °C, t 1 detik
  - $d\gamma = 19,38$  mm
  - $d\alpha = 18,79$  mm
  - $19,38/18,79 = (2/\pi)^{1/6} \cdot (I_s/\alpha)^{1/3} \cdot (18,79)^{2/3}$
  - $1,03115 = 6,6919 \cdot (I_s/\alpha)^{1/3}$
  - $(I_s/\alpha)^{1/3} = 0,15409$
  - $I_s/\alpha = (0,15409)^3 = 3,66 \cdot 10^{-3}$

Data selengkapnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel L2.3 Hasil Perhitungan Rasio Transformasi Austenit Ferit

No	T (°C)	$d\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )									
		$\varepsilon$	0	0,1			0,2			0,5	
		t		1	5	10	1	5	10	1	5
1	1060		1.15	1.26	1.06	1.10	1.03	1.25	1.09	1.17	1.06
2	960		1.04	1.49	1.34		1.15				

Tabel L2.4 Perhitungan Laju Nukleasi Ferit Homogenous ( $I_h/\alpha$ )

No	T (°C)	$I_h/\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $\mu\text{m/s}$ )									
		$\varepsilon$	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				

Tabel L2.5 Perhitungan Laju Nukleasi Ferit Heterogenous ( $I_s/\alpha$ )

No	T (°C)	$I_s/\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $\mu\text{m/s}$ )									
		$\varepsilon$	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				



### Lampiran 3: PENGUKURAN BUTIR

Pengukuran butir menggunakan metode Intercept-Heyn berdasarkan standard ASTM E 112. Metode yang digunakan adalah menghitung jumlah batas butir yang memotong tiga lingkaran,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , sehingga didapat nilai total  $P$ . Jumlah total keliling lingkaran,  $LT$ , adalah 500 mm. Perumusan dalam menghitung nilai diameter butir,  $d$ , yaitu:

$$d = 359.52 * \text{EXP}(-0.3468 * G)$$

dimana

$$G = (-6.646 * \text{LOG}_{10}(L_3)) - 3.298$$

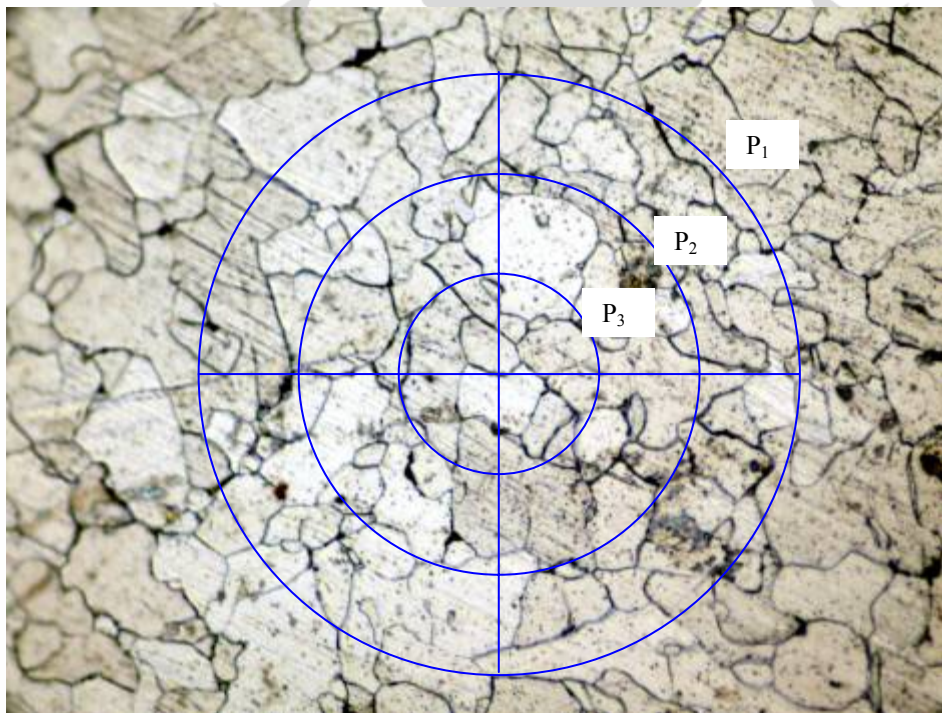
$$L_3 = 1/PL$$

$$PL = P/(M/LT)$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Dengan  $M$  adalah perbesaran.

Tampilan pengukuran butir ditunjukkan seperti pada gambar di bawah.



Contoh perhitungan dapat dijabarkan sebagai berikut:

Contoh perhitungan:

Diketahui:

$$M = 500$$

$$P_1 = 11$$

$$P_2 = 10$$

$$P_3 = 6$$

$$P = 11+10+6 = 27$$

$$PL = 27/(500/500) = 27$$

$$L_3 = 1/27 = 0,037$$

$$G = (-6.646 * \text{LOG}_{10}(0,037)) - 3.298$$

$$= 6,2$$

$$d_1 = 359.52 * \text{EXP}(-0.3468 * (6,2))$$

$$= 41,66 \mu\text{m}$$

Dengan cara yang sama didapat nilai d pada lokasi yang berbeda  $d_2=37,49 \mu\text{m}$ ,  $d_3=40,17 \mu\text{m}$ ,  $d_4=40,17 \mu\text{m}$ . Sehingga diperoleh d rata-rata =  $39,87 \mu\text{m}$  dengan standard deviasi = 1,74

Hasil perhitungan lengkap dapat dilihat pada Tabel L3.1 dan L3.2.

Tabel L3.1 Pengukuran Butir Austenit

LT	500												
T	$\epsilon$	t	M	P1	P2	P3	P	PL	L3	G	d,E112	d(ave)	SD
	<b>0</b>	<b>A</b>	500	13	7	4	24	24	0.0417	5.9	46.87	45.74	1.03
				14	8	3	25	25	0.0400	6.0	44.99		
				14	7	4	25	25	0.0400	6.0	44.99		
				12	9	4	25	25	0.0400	6.0	44.99		
				13	7	4	24	24	0.0417	5.9	46.87		
<b>1060</b>	<b>0,1</b>	<b>1</b>	500	20	17	9	46	46	0.0217	7.8	24.44	25.57	0.80
				18	15	10	43	43	0.0233	7.6	26.14		
				18	17	8	43	43	0.0233	7.6	26.14		
				19	16	9	44	44	0.0227	7.6	25.55		
		<b>5</b>	500	23	18	10	51	51	0.0196	8.1	22.04	22.49	0.37
				21	17	11	49	49	0.0204	7.9	22.94		
				21	19	10	50	50	0.0200	8.0	22.48		
				22	19	9	50	50	0.0200	8.0	22.48		
		<b>10</b>	500	24	14	13	51	51	0.0196	8.1	22.04	21.62	0.48
				25	13	13	51	51	0.0196	8.1	22.04		
				26	14	13	53	53	0.0189	8.2	21.21		
				25	14	14	53	53	0.0189	8.2	21.21		
	<b>0,2</b>	<b>1</b>	500	26	22	9	57	57	0.0175	8.4	19.72	19.39	0.61
				27	24	9	60	60	0.0167	8.5	18.73		
				27	22	10	59	59	0.0169	8.5	19.05		
				25	22	9	56	56	0.0179	8.3	20.07		
		<b>5</b>	500	29	17	10	56	56	0.0179	8.3	20.07	19.76	1.00
				30	15	9	54	54	0.0185	8.2	20.81		
				30	20	11	61	61	0.0164	8.6	18.42		
				28	19	10	57	57	0.0175	8.4	19.72		
		<b>10</b>	500	26	21	10	57	57	0.0175	8.4	19.72	19.00	0.82
				25	24	10	59	59	0.0169	8.5	19.05		
				30	21	12	63	63	0.0159	8.7	17.84		
				28	20	10	58	58	0.0172	8.4	19.38		
	<b>0,5</b>	<b>1</b>	500	28	20	12	60	60	0.0167	8.5	18.73	17.54	1.06
				27	24	11	62	62	0.0161	8.6	18.13		
				29	25	14	68	68	0.0147	8.9	16.53		
				29	26	12	67	67	0.0149	8.8	16.77		
		<b>5</b>	500	31	27	14	72	72	0.0139	9.0	15.61	15.25	0.55
				30	26	15	71	71	0.0141	9.0	15.83		
				32	28	16	76	76	0.0132	9.2	14.78		
				31	29	16	76	76	0.0132	9.2	14.78		
<b>960</b>	<b>0,1</b>	<b>1</b>	500	21	11	7	39	39	0.0256	7.3	28.83	27.54	2.08
				21	12	9	42	42	0.0238	7.5	26.77		
				23	12	10	45	45	0.0222	7.7	24.98		
				20	11	7	38	38	0.0263	7.2	29.59		
		<b>5</b>	500	23	13	9	45	45	0.0222	7.7	24.98	25.60	1.30
				22	12	7	41	41	0.0244	7.4	27.42		
				23	12	9	44	44	0.0227	7.6	25.55		
				24	15	7	46	46	0.0217	7.8	24.44		
	<b>0,2</b>	<b>1</b>	500	27	18	11	56	56	0.0179	8.3	20.07	20.46	0.82
				26	17	12	55	55	0.0182	8.3	20.44		
				27	19	11	57	57	0.0175	8.4	19.72		
				25	19	8	52	52	0.0192	8.1	21.62		

Tabel L3.2 Pengukuran Butir Ferit

LT	500													
T	$\epsilon$	t	M	P1	P2	P3	P	PL	L3	G	d,E112	d(ave)	SD	
1060	0	D	500	11	10	6	27	27	0.0370	6.2	41.66	39.87	1.74	
				15	9	6	30	30	0.0333	6.5	37.49			
				16	8	4	28	28	0.0357	6.3	40.17			
				14	7	7	28	28	0.0357	6.3	40.17			
960	0	E	500	12	8	6	26	26	0.0385	6.1	43.26	43.69	0.87	
				14	7	5	26	26	0.0385	6.1	43.26			
				9	9	7	25	25	0.0400	6.0	44.99			
				11	8	7	26	26	0.0385	6.1	43.26			
1060	0,1	1	500	27	21	11	59	59	0.0169	8.5	19.05	20.31	1.28	
				25	20	10	55	55	0.0182	8.3	20.44			
				26	21	10	57	57	0.0175	8.4	19.72			
					25	18	8	51	51	0.0196	8.1	22.04		
			5	500	22	15	12	49	49	0.0204	7.9	22.94	21.16	2.07
					23	16	10	49	49	0.0204	7.9	22.94		
					27	23	9	59	59	0.0169	8.5	19.05		
					25	21	11	57	57	0.0175	8.4	19.72		
			10	500	28	20	9	57	57	0.0175	8.4	19.72	19.69	1.94
					24	20	7	51	51	0.0196	8.1	22.04		
					27	26	12	65	65	0.0154	8.8	17.29		
					26	20	11	57	57	0.0175	8.4	19.72		
		0,2	1	500	27	22	12	61	61	0.0164	8.6	18.42	18.79	1.21
	26				23	11	60	60	0.0167	8.5	18.73			
	30				25	9	64	64	0.0156	8.7	17.56			
				25	22	8	55	55	0.0182	8.3	20.44			
		5	500	38	27	16	81	81	0.0123	9.4	13.87	14.82	0.86	
				37	26	15	78	78	0.0128	9.3	14.40			
				36	24	14	74	74	0.0135	9.1	15.18			
				37	27	7	71	71	0.0141	9.0	15.83			
		10	500	37	26	13	76	76	0.0132	9.2	14.78	17.40	1.45	
				32	21	10	63	63	0.0159	8.7	17.84			
				31	20	12	63	63	0.0159	8.7	17.84			
				30	24	14	68	68	0.0147	8.9	16.53			
	0,5	1	500	37	26	13	76	76	0.0132	9.2	14.78	15.05	0.29	
35				24	17	76	76	0.0132	9.2	14.78				
31				28	16	75	75	0.0133	9.2	14.98				
				35	24	14	73	73	0.0137	9.1	15.39			
		5	500	37	26	13	76	76	0.0132	9.2	14.78	14.36	0.49	
				39	25	16	80	80	0.0125	9.3	14.04			
				35	26	19	80	80	0.0125	9.3	14.04			
				33	25	17	75	75	0.0133	9.2	14.98			
960	0,1	1	500	29	18	12	59	59	0.0169	8.5	19.05	18.31	1.63	
				32	15	16	63	63	0.0159	8.7	17.84			
				31	13	12	56	56	0.0179	8.3	20.07			
					35	24	10	69	69	0.0145	8.9	16.29		
			5	500	27	23	13	63	63	0.0159	8.7	17.84	19.17	2.24
					31	14	10	55	55	0.0182	8.3	20.44		
					30	12	10	52	52	0.0192	8.1	21.62		
					29	20	18	67	67	0.0149	8.8	16.77		
		0,2	1	500	35	21	10	66	66	0.0152	8.8	17.03	17.87	0.84
30	22				8	60	60	0.0167	8.5	18.73				
33	21				11	65	65	0.0154	8.8	17.29				
				29	22	10	61	61	0.0164	8.6	18.42			