



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN MODEL UKURAN BUTIR FERRIT DAN
KEKERASAN VICKERS BAJA HSLA-0,028%Nb HASIL
CANAI PANAS**

SKRIPSI

**JAMES HANDAJA
0906556566**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN MODEL UKURAN BUTIR FERRIT DAN
KEKERASAN VICKERS BAJA HSLA-0,028%Nb HASIL
CANAI PANAS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**JAMES HANDAJA
0906556566**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : James Handaja

NPM : 0906556566

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Desember 2012





HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : James Handaja
NPM : 0906556566
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengembangan Model Ukuran Butir Ferrit dan Kekerasan Vickers Baja HSLA-0,028% Nb Hasil Canai Panas

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA ()
Penguji 1 : Dr. Ir. Winarto, M.Sc. ()
Penguji 2 : Ir. Rini Riastuti, M.Sc. ()
Penguji 3 : Dr. Richard A.M. Napitupulu, S.T, M.T ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Desember 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas hikmat, kekuatan, mujizat, dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Adapun tujuan penyusunan skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu mata kuliah wajib dan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA sebagai dosen pembimbing, yang telah menawarkan topik serta meluangkan waktu dan pikiran untuk membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini
2. Dr. Richard A.M. Napitupulu, ST, MT, yang telah menyediakan berbagai alat dan bahan untuk penelitian ini, memberikan sangat banyak bantuan dalam hal-hal teknis, memberikan panduan dalam penurunan persamaan, dan membantu sebagian perhitungan ukuran butir ferrit
3. Nofrijon Sofyan, Ph.D, atas kesediaannya berdiskusi mengenai foto mikro dan data kekerasan Vickers yang penulis dapatkan
4. Seluruh dosen di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan ilmu yang berguna
5. Papa, mama, dan adik yang telah memberikan dukungan, doa, dan penguatan kepada penulis dalam masa-masa yang sukar
6. Evennia, S.Farm; Jenifer, S.Farm; Jessica, S.T; Patricia, S.Farm; Pranata Jaya, dan Stepfina yang telah membagikan pengalamannya dalam membuat skripsi serta memberikan banyak masukan yang berharga
7. Rekan-rekan sesama mahasiswa angkatan 2009, khususnya Angga, Boy, Eric, dan Vincent yang mau saling berbagi cerita dan beban dalam penelitian masing-masing
8. Bach, Mozart, Beethoven, Schubert, Chopin, Liszt, Brahms, Tchaikovsky, Godowsky, Rachmaninov, dan Medtner, atas semua musiknya yang telah

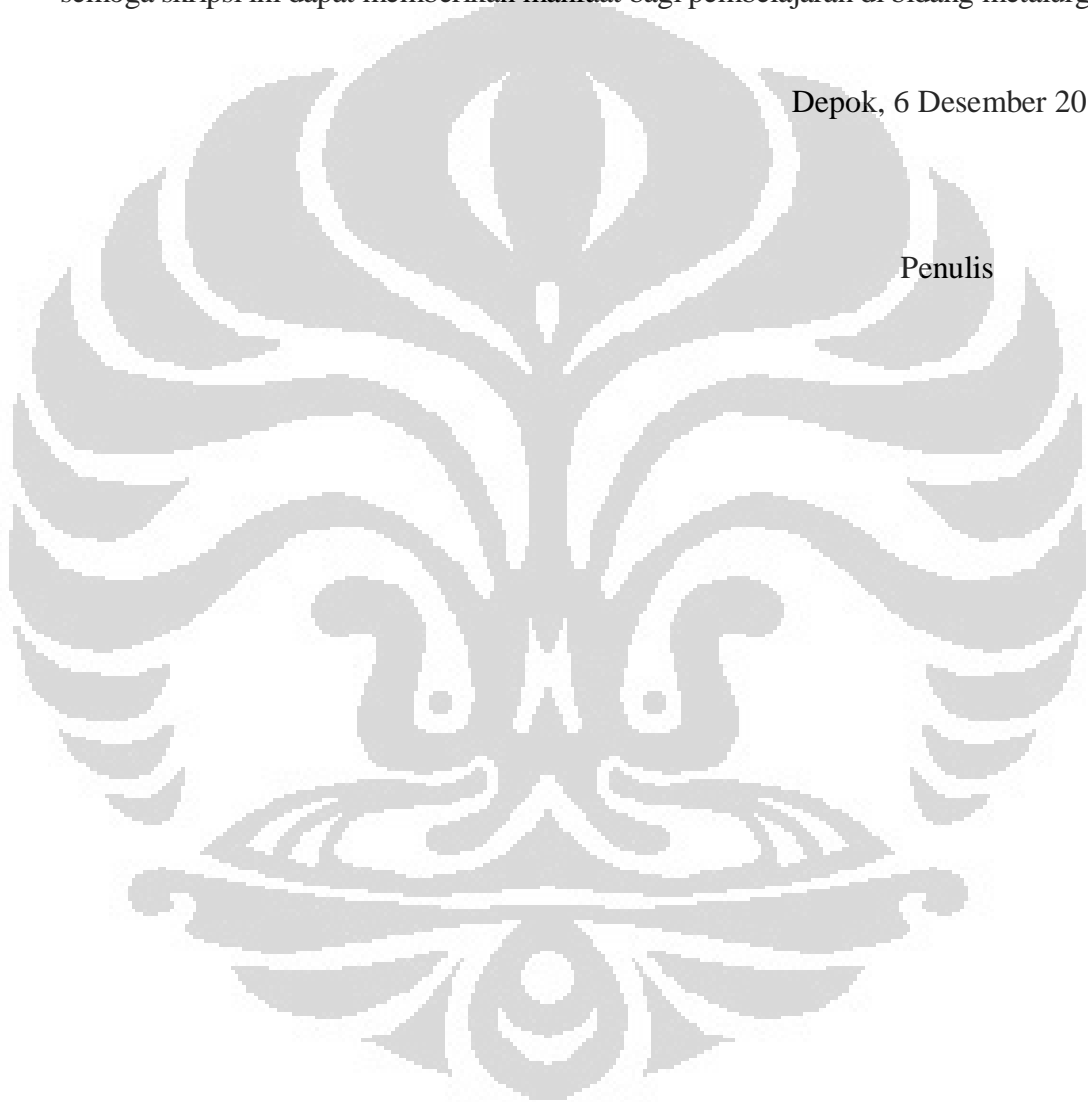
mendampingi penulis selama pengetikan skripsi ini

9. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, baik dalam hal isi maupun teknis. Oleh sebab itu, segala bentuk saran, kritik dan masukan-masukan positif sangat diharapkan demi perbaikan yang akan datang. Akhir kata semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembelajaran di bidang metalurgi.

Depok, 6 Desember 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : James Handaja
NPM : 0906556566
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pengembangan Model Ukuran Butir Ferrit dan Kekerasan Vickers Baja
HSLA-0,028% Nb Hasil Canai Panas**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok
Pada Tanggal: 6 Desember 2012
Yang menyatakan

(James Handaja)

ABSTRAK

Nama : James Handaja
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengembangan Model Ukuran Butir Ferrit dan Kekerasan Vickers Baja HSLA-0,028% Nb Hasil Canai Panas

Variabel-variabel proses canai panas dapat ditentukan sedemikian rupa untuk memproduksi baja paduan dengan ukuran butir ferrit dan sifat mekanis yang spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model ukuran butir ferrit akhir baja HSLA 0,028% Nb berdasarkan variabel-variabel operasional canai panas serta model kekerasan Vickers berdasarkan ukuran butir ferrit akhir. Hasilnya adalah bahwa ukuran butir ferrit akhir dapat diprediksi dari ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, temperatur canai, dan laju pendinginan. Didapatkan juga bahwa kekerasan Vickers dapat diprediksi dari ukuran butir ferrit akhir, regangan, laju regangan, dan temperatur canai.

Kata Kunci: Baja HSLA, variabel-variabel proses canai panas, ukuran butir ferrit, kekerasan Vickers

ABSTRACT

Name : James Handaja
Major : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Development of Ferrite Grain Size and Vickers Hardness Models of Hot-Rolled 0,028% Nb HSLA Steel

Hot rolling variables can be determined as such to produce alloy steels having specific ferrite grain size and mechanical properties. The aim of this research is to develop model of ferrite grain size of 0,028%-Nb HSLA steel based on hot rolling operational variables and model of Vickers hardness based on the final ferrite grain size. Results show that ferrite grain size can be predicted based on the initial austenite grain size, strain, strain rate, rolling temperature, and cooling rate. It is also found that Vickers hardness can be predicted based on the final ferrite grain size, strain, strain rate, and rolling temperature.

Keywords: HSLA steel, hot rolling variables, ferrite grain size, Vickers hardness

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.4.1 Material	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Hipotesis.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 DASAR TEORI.....	7
2.1 Baja	7
2.2 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	8
2.3 Baja HSLA (<i>High Strength Low Alloy</i>).....	10
2.4 Perlakuan Termomekanik (<i>Thermomechanical Treatment</i>).....	11
2.5 Proses-Proses Metalurgi Selama Proses Canai Panas.....	13
2.5.1 <i>Heating</i>	14
2.5.2 <i>Roughing</i>	17
2.5.3 <i>Delay</i>	21
2.5.4 <i>Finishing</i>	23
2.5.5 <i>Cooling</i>	24
2.6 Persamaan Ukuran Butir Ferrit Hasil Canai Panas Baja HSLA.....	26
2.7 Mekanisme Penguatan Dalam Baja HSLA	27
2.7.1 Penguatan Larutan Padat.....	27
2.7.2 Penguatan Presipitat.....	28
2.7.3 Pengerasan Kerja	29
2.7.4 Penghalusan Butir	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31

3.2	Alat dan Bahan.....	32
3.2.1	Alat.....	32
3.2.2	Bahan	32
3.3	Prosedur Penelitian.....	33
3.3.1	Material	33
3.3.2	Perlakuan Sampel yang Tidak Dicanai Panas	34
3.3.3	Persiapan Sampel yang Akan Dicanai Panas	34
3.3.4	Canai Panas	36
3.3.5	Persiapan Metalografi dan Pengambilan Foto Mikro.....	38
3.3.6	Perhitungan Ukuran Butir Ferrit.....	40
3.3.7	Pengujian Kekerasan Vickers.....	41
BAB 4	DATA DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1	Data	43
4.1.1	Data Perlakuan Sampel	43
4.1.2	Data Ketebalan Sampel.....	43
4.1.3	Data Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan	44
4.1.4	Foto Struktur Mikro Sampel.....	45
4.1.5	Data Ukuran Butir Ferrit.....	48
4.1.6	Data Kekerasan Vickers.....	50
4.2	Pembahasan Data Ukuran Butir Ferrit	50
4.2.1	Pembahasan Canai Panas dan Mikrostruktur yang Diperoleh ...	50
4.2.2	Penentuan dan Validasi Model Ukuran Butir Ferrit	54
4.2.3	Pembahasan Model Ukuran Butir Ferrit	66
4.3	Pembahasan Data Kekerasan Vickers.....	69
4.3.1	Pembahasan Kekerasan Vickers yang Didapat.....	69
4.3.2	Penentuan dan Validasi Model Kekerasan Vickers	70
4.3.3	Pembahasan Model Kekerasan Vickers	78
BAB 5	KESIMPULAN.....	81
	DAFTAR REFERENSI	82
	LAMPIRAN	87

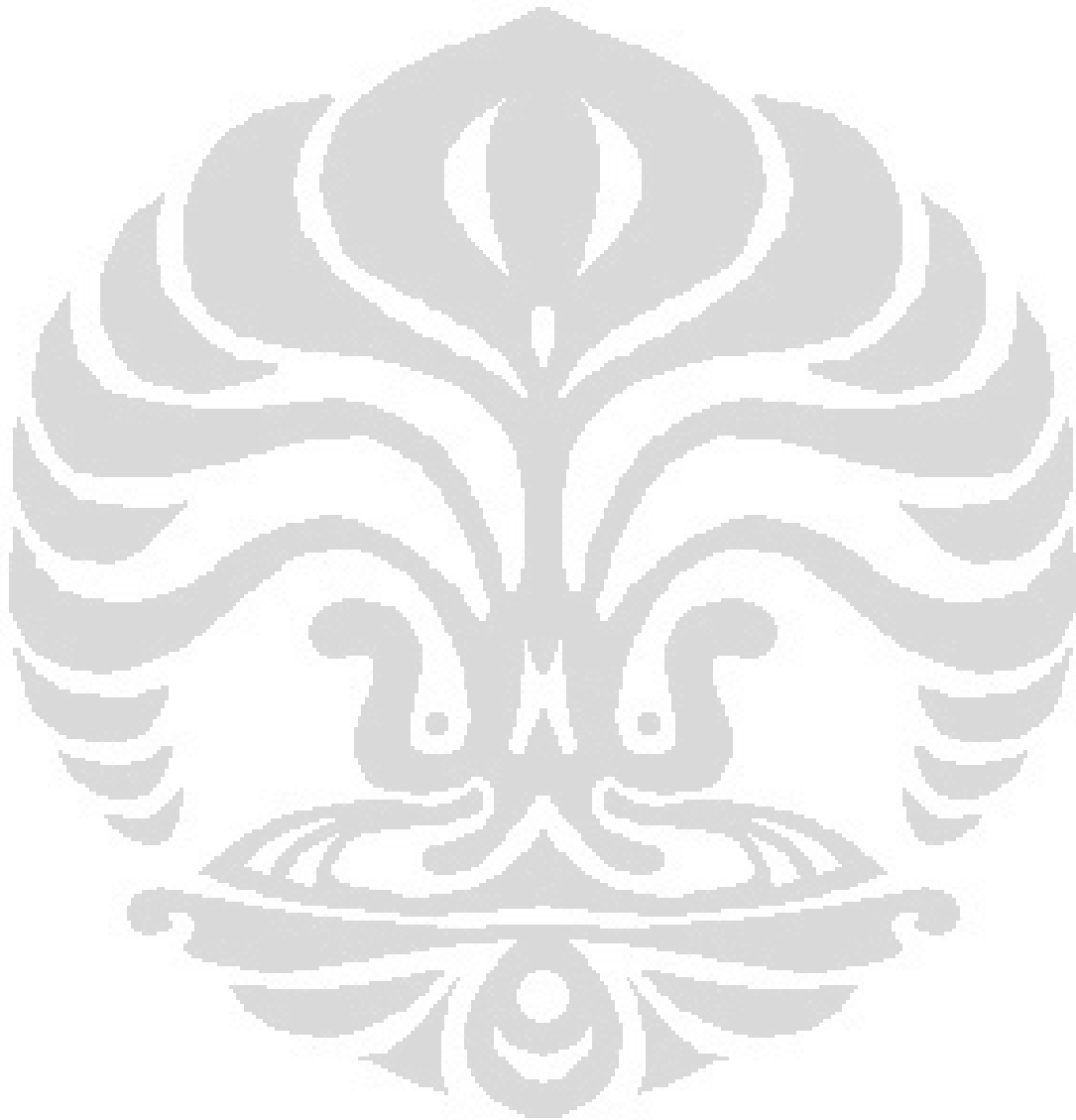
DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi Kimia Baja HSLA ASTM A572	34
Tabel 3.2. Hubungan Ukuran Butir ASTM dengan Ukuran Butir Rata-Rata.....	41
Tabel 4.1. Data Perlakuan Sampel.....	43
Tabel 4.2. Ketebalan Sampel Sebelum dan Sesudah Canai Panas	44
Tabel 4.3. Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan Setiap Titik Dalam Sampel	44
Tabel 4.4. Regangan, Laju Regangan, dan Ukuran Butir Ferrit Pada Sampel yang Dicanai Panas	49
Tabel 4.5. Kekerasan Vickers Seluruh Titik Dalam Sampel.....	50
Tabel 4.6. Kemungkinan nilai ln b dan B	56
Tabel 4.7. Kemungkinan nilai ln c dan C.....	57
Tabel 4.8. Nilai d_α dan ln d_α pada $\varepsilon = 0,6$ untuk Ketiga Sampel	58
Tabel 4.9. 9 Kombinasi Koefisien yang Mungkin.....	60
Tabel 4.10 9 Kombinasi Pangkat yang Mungkin	60
Tabel 4.11 Data Perlakuan Sampel No.2	63
Tabel 4.12 Ketebalan Sampel No.2 Sebelum dan Sesudah Canai Panas.....	64
Tabel 4.13 Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan Setiap Titik Dalam Sampel No.2.	64
Tabel 4.14 Regangan, Laju Regangan, dan Ukuran Butir Ferrit Pada Sampel No.2	64
Tabel 4.15 Persentase Kesalahan Relatif Ukuran Butir Ferrit	67
Tabel 4.16 Kemungkinan nilai ln f dan F	71
Tabel 4.17 Kemungkinan nilai ln g dan G	72
Tabel 4.18 Nilai HVN dan ln HVN pada $d_\alpha^{-0,5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon} = 3$ untuk Ketiga Sampel .	73
Tabel 4.19 9 Kombinasi Koefisien yang Mungkin.....	74
Tabel 4.20 9 Kombinasi Pangkat yang Mungkin	75
Tabel 4.21 Kekerasan Vickers Seluruh Titik Dalam Sampel No.2	77
Tabel 4.22 Persentase Kesalahan Relatif Kekerasan Vickers	79

DAFTAR GAMBAR

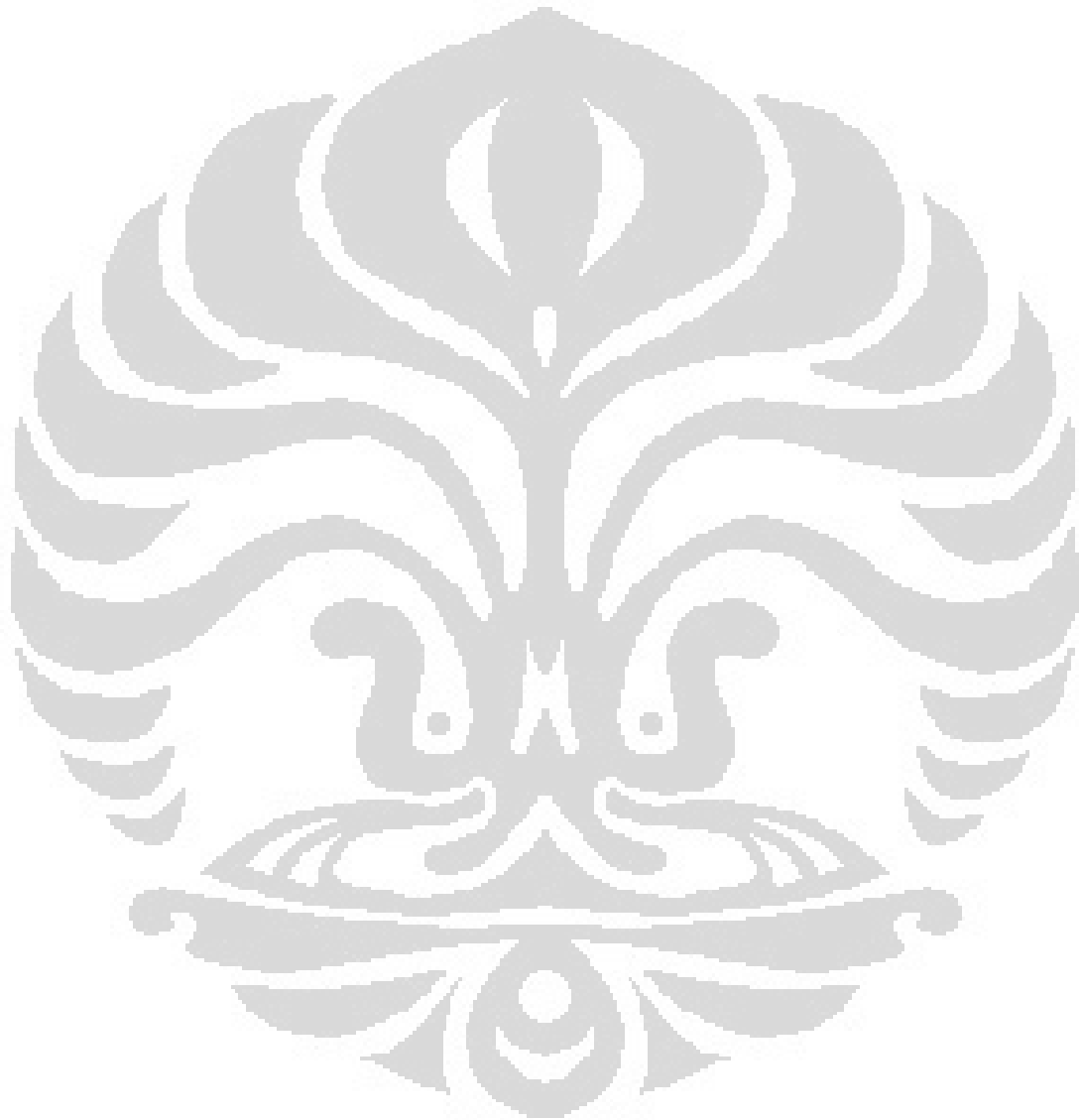
Gambar 2.1	Klasifikasi Paduan Logam [2].....	7
Gambar 2.2	Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C [2].....	8
Gambar 2.3	Contoh Mikrostruktur Baja HSLA [5].....	11
Gambar 2.4	Proses Pencapaian Logam [2]	12
Gambar 2.5	Kelima Tahap Canai Panas [18].....	13
Gambar 2.6	Pertumbuhan Butir [2]	15
Gambar 2.7	Grafik f_v vs T[20]	17
Gambar 2.8	Rekristalisasi Dinamis [30]	19
Gambar 2.9	Rekristalisasi Statik [30]	22
Gambar 2.10	Tegangan Kisi Disekitar Atom Interstisi [2]	28
Gambar 2.11	Tegangan Kisi Disekitar Atom Substitusi [2]	28
Gambar 2.12	Penghalangan Pergerakan Dislokasi Oleh Batas Butir [2].....	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 3.2	Sampel yang Sudah Digurat	35
Gambar 3.3	Termometer Digital.....	36
Gambar 3.4	Mesin Canai.....	36
Gambar 3.5	<i>Furnace</i>	37
Gambar 3.6	<i>Inverter</i>	37
Gambar 3.7.	Sampel Setelah Canai Panas.....	38
Gambar 3.8.	Sampel yang Sudah Di-mounting	39
Gambar 3.9	Alat Amplas Manual.....	39
Gambar 3.10	Mesin Poles	39
Gambar 3.11	Mikroskop Optik Digital	40
Gambar 3.12	Alat Uji Kekerasan Vickers.....	42
Gambar 4.1	Foto Struktur Mikro Sampel yang Tidak Dicanai Panas	45
Gambar 4.2	Foto Struktur Mikro Sampel 4 Pada Empat Titik Yang Berbeda...46	
Gambar 4.3	Foto Struktur Mikro Sampel 5 Pada Empat Titik Yang Berbeda...47	
Gambar 4.4	Foto Struktur Mikro Sampel 7 Pada Empat Titik Yang Berbeda...48	
Gambar 4.5	Perbandingan d_α Hasil Beberapa Penelitian vs ϵ	53
Gambar 4.6	Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$	56
Gambar 4.7	Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \dot{\epsilon}$	57
Gambar 4.8	Grafik d_α vs ϵ	58
Gambar 4.9	Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln T$	59
Gambar 4.10	Perbandingan d_α Model dan d_α Penelitian vs ϵ	61
Gambar 4.11	Perbandingan d_α Model Modifikasi, d_α Model Lain dan d_α Penelitian vs ϵ	62
Gambar 4.12	Foto Struktur Mikro Sampel 2 Pada Empat Titik Yang Berbeda...65	
Gambar 4.13	Perbandingan d_α Model Modifikasi dan d_α Sampel No.2 vs ϵ66	
Gambar 4.14	Grafik HVN vs $d^{0.5}$	69
Gambar 4.15	Grafik $\ln HVN$ vs $\ln \epsilon$	71
Gambar 4.16	Grafik $\ln HVN$ vs $\ln \dot{\epsilon}$	72
Gambar 4.17	Grafik HVN vs $d_\alpha^{-0.5} \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$	73
Gambar 4.18	Grafik $\ln HVN$ vs $\ln T$	74
Gambar 4.19	Perbandingan $\ln HVN$ Model dan $\ln HVN$ Penelitian vs $\ln (d_\alpha^{-0.5} \times \epsilon \times \dot{\epsilon})$	76

Gambar 4.20 Perbandingan HVN Model Modifikasi dan HVN Penelitian vs $d_{\alpha}^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$	77
Gambar 4.21 Perbandingan HVN Model Modifikasi dan HVN Sampel No.2 vs $d_{\alpha}^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$	78



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Ukuran Butir Ferrit	88
Lampiran 2 Perhitungan Kekerasan Vickers	162



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan material logam yang paling banyak digunakan [1]. Penggunaan baja dalam jumlah besar ini antara lain disebabkan oleh kemudahan baja untuk diproduksi dengan sifat-sifat mekanis yang sangat bervariasi [2] dan untuk dibuat dengan spesifikasi yang sangat presisi [1] sesuai dengan kebutuhan di dalam aplikasinya.

Salah satu faktor yang menentukan sifat-sifat mekanis baja adalah komposisi kimianya. Sebelum Perang Dunia II, kekuatan luluh baja dapat ditingkatkan dengan penambahan karbon hingga 0,4% dan mangan hingga 1,5% [1]. Namun demikian, baja ini memiliki keuletan dan ketangguhan yang buruk. Untuk menghindari masalah tersebut, maka kadar karbon dalam baja harus dikurangi hingga dibawah 0,1% [3]. Tetapi pengurangan kadar karbon ini juga mengakibatkan penurunan kekuatan baja.

Selain komposisi kimia, sifat-sifat mekanis baja juga ditentukan oleh ukuran butirnya. Pendinginan yang lambat setelah pembekuan menghasilkan mikrostruktur berupa austenit atau mikrostruktur hasil transformasi yang lain (seperti ferrit) dengan butir berukuran besar dan tidak seragam [4]. Butir berukuran besar tersebut perlu dibuat menjadi butir yang halus, sebab butir yang lebih halus ini akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja [5]. Penghalusan butir ini dapat dicapai dengan memberikan perlakuan termomekanik (*thermomechanical treatment*). Perlakuan termomekanik melibatkan pemberian panas dan deformasi secara bersamaan pada paduan, dengan tujuan untuk mengubah bentuknya dan menghaluskan mikrostrukturnya [1]. Dengan demikian, proses canai panas merupakan salah satu bentuk dari perlakuan termomekanik. Penghalusan butir ini dapat dicapai dengan cukup memuaskan melalui proses canai panas [4].

Dengan demikian, penurunan sifat mekanis karena pengurangan kadar karbon dapat diatasi dengan penghalusan ukuran butir ferrit melalui proses canai

panas. Proses canai panas memungkinkan pembuatan baja dengan kekuatan luluh yang tinggi tanpa mengorbankan keuletan dan ketangguhannya. Penghalusan butir ini sulit dicapai dengan baja karbon biasa [3], namun hal ini dapat diatasi dengan penambahan unsur-unsur penghalus butir dalam jumlah kecil, seperti niobium, titanium, dan vanadium [1]. Baja yang diproduksi dengan cara demikian dikenal sebagai baja HSLA (*High Strength Low Alloy*).

Menurut Liu dkk (2005), peningkatan sifat mekanis baja HSLA dapat disebabkan oleh banyak hal, namun yang terutama ialah oleh penghalusan butir [6]. Hubungan antara ukuran butir ferrit dengan beberapa sifat mekanis telah dikompilasi oleh Majta dkk (1996) [7]. Dari persamaan-persamaan tersebut dapat dilihat secara kuantitatif bagaimana pengaruh ukuran butir ferrit terhadap berbagai sifat mekanis baja.

1.2 Rumusan Masalah

Sifat-sifat mekanis baja dipengaruhi oleh ukuran butir ferritnya. Dengan demikian, untuk membuat baja HSLA dengan sifat-sifat tertentu yang spesifik untuk berbagai kebutuhan, ukuran butir ferrit akhir yang didapatkan harus ditentukan dengan akurat. Lebih jauh lagi, ukuran butir ferrit akhir tersebut ditentukan oleh variabel-variabel operasional canai panas yang digunakan. Oleh sebab itu, perlu dikembangkan suatu persamaan untuk memprediksi ukuran butir ferrit akhir baja berdasarkan variabel-variabel operasional canai panas, seperti ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, temperatur canai panas, dan laju pendinginan.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, ukuran butir ferrit yang diperoleh ini akan mempengaruhi sifat-sifat mekanis baja. Salah satu sifat mekanis yang terpengaruh adalah kekerasan Vickers. Untuk itu, perlu dikembangkan suatu persamaan untuk memprediksi kekerasan Vickers baja berdasarkan ukuran butir ferritnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan persamaan untuk memprediksi ukuran butir ferrit hasil canai panas dari variabel-variabel operasional canai panas, seperti ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, dan temperatur canai panas.
2. Mengembangkan persamaan untuk memprediksi kekerasan Vickers dari ukuran butir ferrit akhir.

1.4 Batasan Masalah

1.4.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja HSLA ASTM A572. Material tersebut telah dibentuk sedemikian dengan proses permesinan sehingga memiliki panjang bervariasi antara 71,3-72,1 mm, lebar bervariasi antara 30,5-31 mm, dan tebal yang bertambah dari depan ke belakang; bervariasi antara 4-4,5 mm di bagian depan dan antara 5,6-6,7 mm di bagian belakang.

1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Material yang digunakan dipanaskan ulang hingga temperatur 900°C sebelum dicanai panas.
- b. Proses canai panas dilakukan satu kali pada temperatur 850°C, 800°C, dan 750°C dengan lebar celah rol sebesar 2,4 mm.
- c. Proses canai panas dilakukan pada frekuensi arus AC sebesar 40 Hz, yang menghasilkan kecepatan putar rol sebesar 137 mm/s.
- d. Pendinginan material dari temperatur pemanasan ulang hingga mencapai temperatur canai panas, dan pendinginan material setelah canai panas, dilakukan dengan pendinginan udara.

1.4.3 Tempat Penelitian

- a. Proses canai panas dilakukan di Laboratorium Teknik Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
- b. Preparasi metalografi dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
- c. Pengujian kekerasan Vickers dilakukan di Laboratorium Pengujian Merusak Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

1.5 Hipotesis

Menurut Kern dkk, proses canai panas dapat dibagi menjadi tahap *heating*, *roughing*, *delay*, *finishing*, dan *cooling* [8]. Ada berbagai proses metalurgi yang terjadi dalam kelima tahap tersebut, seperti pengerasan regang, *dynamic recovery* dan *recrystallization*, *static recovery* dan *recrystallization*, pertumbuhan butir, dan transformasi fasa dari austenit menjadi ferrit.

Setiap proses metalurgi ini dapat dideskripsikan secara kuantitatif melalui variabel-variabel canai panas seperti temperatur pemanasan ulang, temperatur canai panas, regangan, dan laju regangan; dan akan mempengaruhi ukuran butir ferrit akhir yang didapatkan setelah canai panas. Oleh karena itu, dapat dibuat suatu persamaan yang mendeskripsikan pengaruh dari variabel-variabel operasional canai panas tersebut terhadap ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh.

Ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh akan semakin halus dengan semakin halusnya ukuran butir austenit, yang dipengaruhi oleh temperatur pemanasan ulang; dengan semakin rendahnya temperatur canai panas; dan dengan semakin tingginya regangan, laju regangan, dan laju pendinginan. Dari kelima variabel tersebut, dapat dibuat suatu persamaan yang dapat digunakan untuk memprediksi ukuran butir ferrit akhir yang didapatkan. Selain itu, penghalusan ukuran butir ferrit akan meningkatkan sifat-sifat mekanis baja, secara spesifik kekerasannya Vickersnya. Persamaan-persamaan yang telah ditemukan sebelumnya untuk memprediksi ukuran butir ferrit serta persamaan yang menghubungkan ukuran

butir dengan sifat mekanis yang akan dikembangkan dalam penelitian ini akan dibahas lebih jauh pada bab selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini akan dibagi menjadi 5 (lima) bab, seperti yang diperlihatkan sebagai berikut:

Bab 1: Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

Bab 2: Dasar Teori

Bab ini menjelaskan mengenai baja, diagram fasa Fe-Fe₃C, baja HSLA, dan proses canai panas beserta sub-sub prosesnya, yakni *heating*, *roughing*, *delay*, *finishing*, dan *cooling*. Kemudian, akan dijelaskan mengenai proses-proses metalurgi yang terjadi selama proses canai panas, yakni pengerasan regang, *dynamic recovery* dan *recrystallization*, *dynamic strain-induced transformation*, *static recovery* dan *recrystallization*, pertumbuhan butir, dan transformasi fasa dari austenit menjadi ferrit. Di bab ini juga akan diperlihatkan persamaan-persamaan yang diperoleh dari penelitian-penelitian terdahulu untuk memprediksi ukuran butir ferrit dari berbagai variabel canai panas, serta persamaan-persamaan untuk memprediksi sifat mekanis dari ukuran butir ferrit. Terakhir, akan dijelaskan mengenai mekanisme penguatan yang bekerja dalam baja HSLA.

Bab 3: Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan mengenai diagram alir penelitian, parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian, alat dan bahan yang digunakan, dan prosedur penelitian.

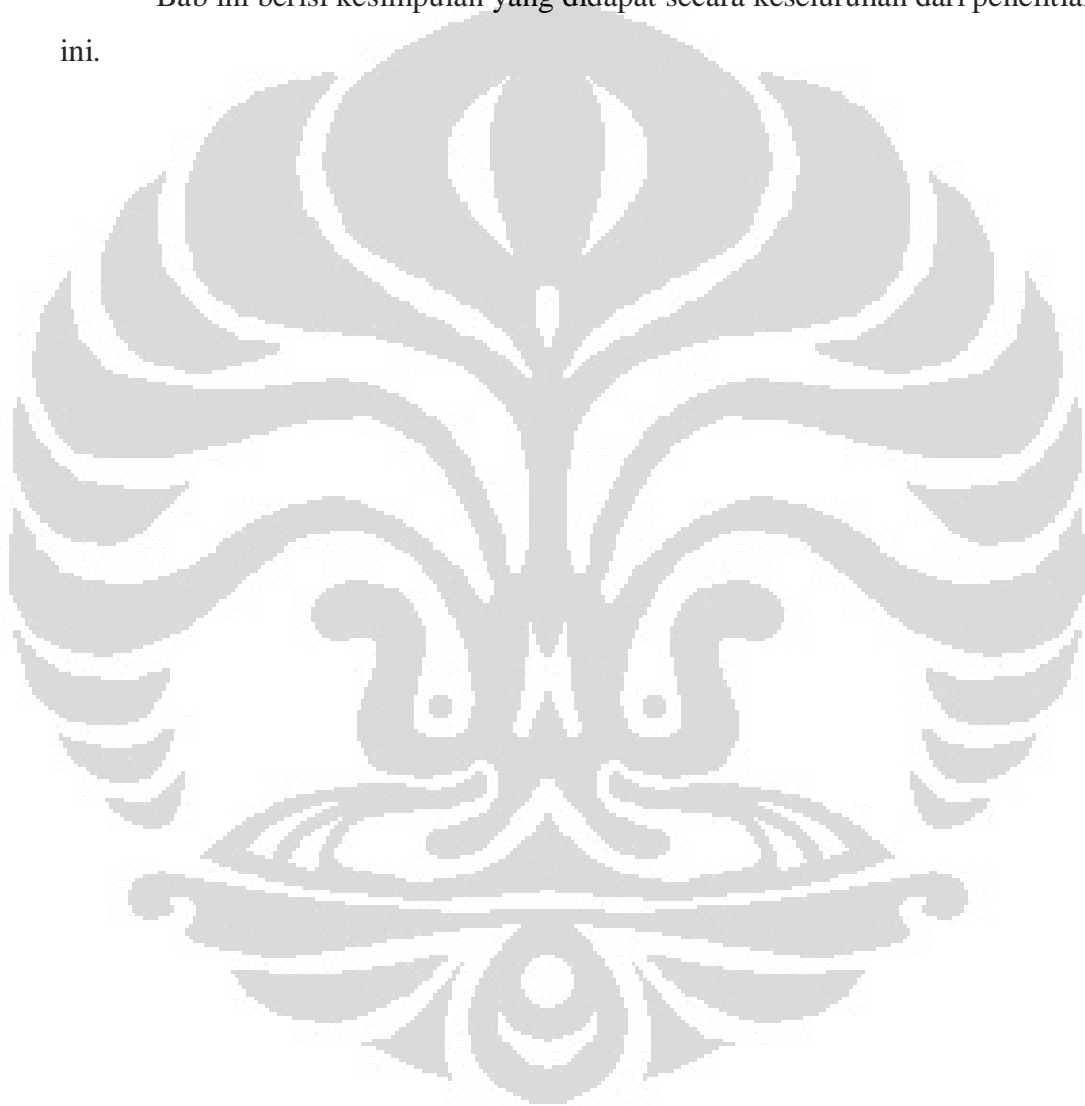
Bab 4: Data dan Pembahasan

Bab ini akan menyajikan data-data yang diperoleh sebagai hasil penelitian beserta pembahasannya. Data-data yang diperoleh berupa perubahan tebal, reduksi, regangan, dan laju regangan; ukuran butir ferrit sampel yang sudah dicanai panas; dan kekerasan Vickers sampel yang belum dan sudah dicanai

panas. Sementara pembahasan akan meliputi pembahasan data yang didapatkan dari penelitian, cara yang ditempuh hingga didapatkan persamaan untuk memprediksi ukuran butir ferrit dari variabel-variabel operasional canai panas, serta persamaan untuk memprediksi kekerasan Vickers dari ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh, serta pembahasan dari persamaan yang telah didapatkan.

Bab 5: Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat secara keseluruhan dari penelitian ini.

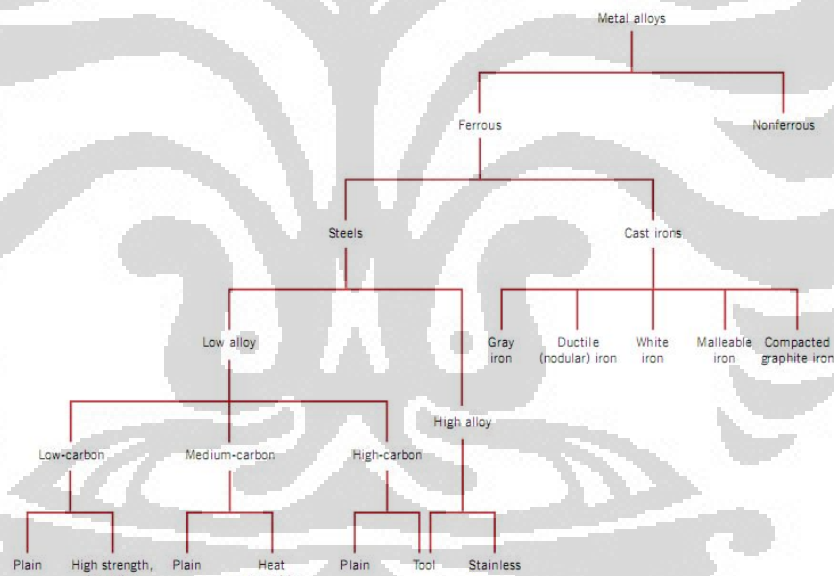


BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Baja

Baja merupakan paduan besi dan karbon yang dapat mengandung unsur pepadu dalam jumlah yang cukup besar [2]. Gambar 2.1 berikut ini menunjukkan pembagian paduan logam berdasarkan komposisi kimianya. Bersama dengan besi cor, baja digolongkan sebagai paduan *ferrous* karena komposisi kimianya yang didominasi oleh unsur Fe. Lebih jauh lagi, baja dapat digolongkan berdasarkan komposisi karbonnya menjadi baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi [2]. Ketiga golongan ini masih dapat dibagi menjadi golongan-golongan yang lebih spesifik lagi.



Gambar 2.1 Klasifikasi Paduan Logam [2]

Karbon merupakan unsur paduan utama dalam baja. Sifat-sifat mekanis baja sangat sensitif terhadap kandungan karbonnya, yang pada umumnya kurang dari 1 % [2].

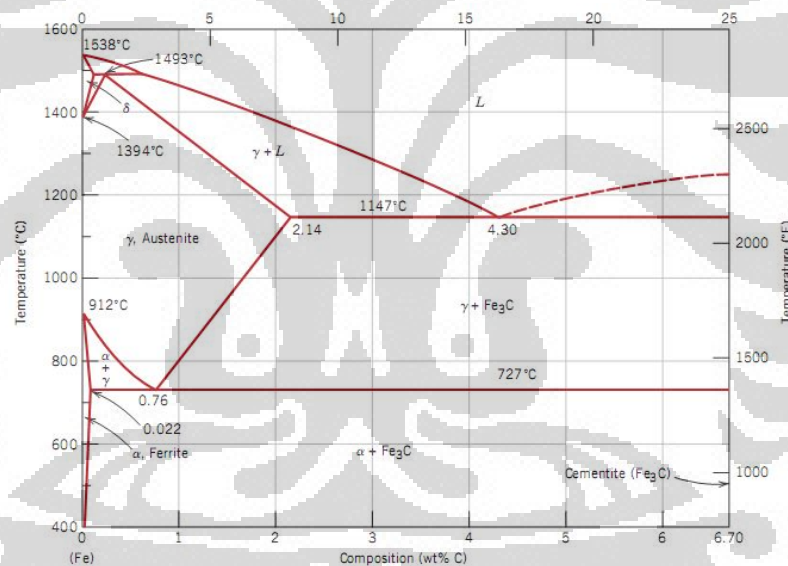
Selain karbon, baja juga dapat mengandung unsur-unsur paduan lainnya. Unsur-unsur ini dapat ditambahkan untuk menghilangkan unsur-unsur pengikat atau untuk memberikan sifat-sifat tertentu pada baja. Sebagai contoh, Mn

ditambahkan untuk men-deoksidasi baja [9], Cr ditambahkan untuk memberikan ketahanan korosi pada baja [1].

Disamping unsur-unsur paduan tersebut, baja juga mengandung unsur-unsur pengikat, seperti S, P, N, dan O. Unsur-unsur pengikat ini merusak sifat dan kualitas baja, oleh sebab itu kadarnya dalam baja harus dibuat serendah mungkin [9].

2.2 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Mikrostruktur yang terdapat dalam baja dipengaruhi oleh temperatur dan komposisi kimianya, terutama kandungan karbonnya. Pengetahuan untuk memahami mikrostruktur baja ialah diagram fasa besi-besi karbida (Fe-Fe₃C), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2.2 Diagram Fasa Fe-Fe₃C [2]

Besi murni ada dalam dua bentuk kristal pada tekanan atmosferik [1]. Dari diagram fasa diatas dapat dilihat bahwa besi murni akan berada dalam tiga fasa ketika dipanaskan dari temperatur ruang hingga temperatur leburnya. Bentuk kristal pertama adalah BCC (besi-α, ferrit) yang stabil dari temperatur rendah hingga 912°C. Temperatur ini disebut temperatur Ae₃. Diatas suhu tersebut ferrit-α akan bertransformasi menjadi fasa yang lain. Namun temperatur transformasi ini akan berkurang dengan peningkatan kadar karbon hingga 727°C

untuk kadar karbon 0,76%. Temperatur ini disebut temperatur Ae_1 . Kelarutan padat maksimum karbon dalam ferrit- α sangat rendah, hanya mencapai 0,022% pada temperatur 727°C . Hal ini tercermin dari luas wilayah fasa α yang sangat terbatas dalam diagram fasa.

Diatas temperatur Ae_3 atau Ae_1 , terjadi transformasi fasa menjadi bentuk kristal FCC (besi- γ , austenit). Fasa γ ini tidak stabil dibawah temperatur 727°C , oleh sebab itu tidak ada fasa γ yang terbentuk dibawah temperatur tersebut. Besi- γ ini tetap stabil hingga temperatur 1394°C untuk besi murni dan hingga temperatur 1493°C untuk kadar karbon 0,16%. Kelarutan maksimum karbon dalam fasa γ mencapai 2,14% pada temperatur 1147°C .

Diatas temperatur tersebut, besi akan kembali ke bentuk kristal BCC (besi- δ) yang tetap stabil hingga titik lebur. Ferrit- δ sama dengan ferrit- α , kecuali dalam hal rentang temperatur keberadaannya [2]. Kelarutan karbon dalam ferrit- δ juga sangat rendah, hal ini dapat dilihat dari wilayah fasa ferrit- δ yang sangat terbatas, dan tidak terbentuk ketika kadar karbon mencapai 0,5% [1].

Sementit (Fe_3C) terbentuk ketika batas kelarutan karbon dalam ferrit- α terlampaui dibawah temperatur Ae_1 [2]. Sementit juga dapat berada bersama-sama dengan fasa γ dalam rentang temperatur 727°C hingga 1147°C . Sementit merupakan fasa metastabil, dan secara termodinamika akan terdekomposisi menjadi ferrit dan grafit. Namun karena laju dekomposisi sementit sangat lambat, maka seluruh karbon yang terkandung dalam baja akan ada dalam Fe_3C dan bukan grafit [2]. Untuk baja dalam wilayah $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, fasa ferrit dan sementit ini akan terlihat seperti lapisan lamellar yang berselang-seling. Mikrostruktur yang demikian dinamakan perlit.

Temperatur-temperatur yang terdapat dalam diagram fasa hanya berlaku untuk transformasi fasa yang berlangsung dalam keadaan setimbang. Namun, keadaan setimbang hanya dapat dicapai pada laju pemanasan atau pendinginan yang sangat lambat dan tidak praktis dalam aplikasi [2]. Karena itu, dalam kenyataannya, transformasi fasa akan terjadi pada temperatur yang berbeda dari temperatur yang diperlihatkan dalam diagram fasa. Dengan demikian, setiap temperatur transformasi dalam diagram fasa dapat dibagi menjadi tiga, untuk kondisi pemanasan (Ac), kondisi setimbang (Ae), dan kondisi pendinginan (Ar)

[1]. Sebagai contoh, dalam kondisi pemanasan, austenit mulai terbentuk pada temperatur A_{c1} . Sementara itu, dalam kondisi pendinginan, austenit selesai bertransformasi menjadi ferrit pada temperatur A_{r1} .

Keberadaan unsur-unsur kimia yang lain dalam baja akan mempengaruhi bentuk diagram fasa Fe-Fe₃C. Secara umum, unsur-unsur tersebut dapat mempengaruhi diagram fasa dalam dua cara [1]. Cara pertama ialah dengan memperlebar wilayah γ dan memungkinkan pembentukan austenit dalam rentang temperatur yang lebih lebar. Unsur-unsur yang memberikan pengaruh demikian disebut sebagai penstabil γ , antara lain Ni, Mn, Cu, C, dan N [1]. Cara kedua ialah dengan mempersempit wilayah γ dan memungkinkan pembentukan ferrit dalam rentang temperatur yang lebih lebar. Unsur-unsur yang memberikan pengaruh demikian disebut sebagai penstabil α , antara lain Cr, Mo, Nb, Si, dan Al [1].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkuantifikasi pengaruh penambahan unsur-unsur tersebut terhadap perubahan temperatur A_{e1} dan/atau A_{e3} . Salah satu persamaan diperlihatkan berikut ini untuk menentukan temperatur A_{c1} dan A_{c3} berdasarkan komposisi kimia baja [10]:

$$A_{c1} = 723 - 20,7 \text{ Mn} - 16,9 \text{ Ni} + 29,1 \text{ Si} - 16,9 \text{ Cr} \quad (2.1)$$

$$A_{c3} = 910 - 203 \sqrt{C} + 44,7 \text{ Si} - 15,2 \text{ Ni} + 31,5 \text{ Mo} + 104 \text{ V} \quad (2.2)$$

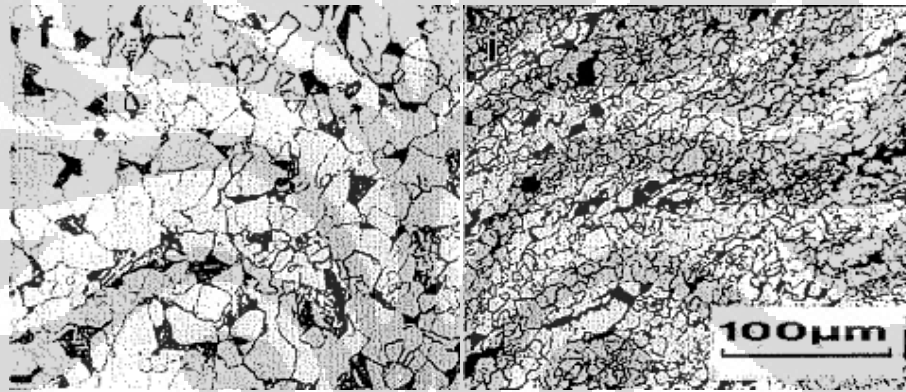
2.3 Baja HSLA (*High Strength Low Alloy*)

Baja *High Strength Low Alloy* (HSLA) merupakan baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi. Baja ini ulet, mudah dibentuk, mudah di-*machining* [2] dan memiliki kekuatan luluh minimal 275 MPa yang dicapai dalam kondisi dicanai panas, dan bukan dengan perlakuan panas [11].

Pada mulanya, peningkatan sifat mekanis baja dicapai dengan cara penambahan karbon hingga 0,4% dan mangan hingga 1,5% [1]. Namun baja yang demikian memiliki ketangguhan yang rendah. Kadar karbon yang tinggi juga menimbulkan keretakan ketika baja tersebut dilas. Untuk dapat dilas dengan memuaskan, kadar karbon dalam baja harus dibuat lebih rendah (<0,1% C) [3], tetapi hal ini akan menurunkan kekuatan baja.

Untuk mengkompensasi penurunan kekuatan baja akibat pengurangan kadar karbon tersebut, ukuran butir dalam baja harus diperhalus. Proses canai yang terkendali di wilayah temperatur austenit secara bertahap diperkenalkan untuk mencapai hal ini [1], namun sulit dicapai dengan baja karbon biasa [3], tetapi dapat dicapai dengan penambahan dalam jumlah kecil ($<0,1\%$) unsur-unsur penghalus butir, seperti Nb, Ti, V, dan Al [1]. Penambahan unsur-unsur tersebut ke dalam baja berperan penting untuk mendapatkan kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang tinggi [12].

Gambar 2.3 berikut ini menunjukkan contoh mikrostruktur baja HSLA yang tidak dicanai panas (gambar kiri) dan yang dicanai panas (gambar kanan) [5]. Terlihat bahwa canai panas mampu menghaluskan mikrostruktur baja HSLA.



Gambar 2.3 Contoh Mikrostruktur Baja HSLA [5]

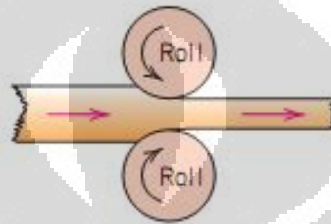
Peningkatan sifat mekanis baja HSLA dibandingkan dengan baja karbon biasa diperoleh bukan akibat penambahan unsur-unsur *microalloying* saja, namun juga dengan penghalusan butir melalui perlakuan termomekanik yang tepat, seperti yang akan dibahas lebih jauh pada bagian berikut ini.

2.4 Perlakuan Termomekanik (*Thermomechanical Treatment*)

Perlakuan termomekanik melibatkan pemberian panas dan proses deformasi bersama-sama pada sebuah paduan logam, dengan tujuan untuk merubah bentuknya dan menghaluskan mikrostrukturnya [1]. Salah satu bentuk dari perlakuan termomekanik ialah proses canai panas pada logam. Namun sebelum

dijelaskan mengenai canai panas, akan dijelaskan lebih dahulu mengenai proses canai itu sendiri.

Proses canai terdiri dari melewati sebuah logam diantara dua rol; kedua rol tersebut mengerjakan gaya tekan yang menyebabkan pengurangan ketebalan logam [2]. Pada umumnya masukan proses canai ialah *cast ingot* logam dan keluarannya ialah pelat (*plate*), lembaran (*sheet*), atau foil [13]. Gambar 2.4 berikut ini menunjukkan proses canai secara skematis:



Gambar 2.4 Proses Pencanaian Logam [2]

Berdasarkan temperatur prosesnya, proses canai dapat diklasifikasikan menjadi dua, yakni canai panas (dilakukan diatas temperatur rekristalisasi) dan canai dingin (dilakukan pada temperatur ruang atau dapat juga pada temperatur tinggi, namun masih dibawah temperatur rekristalisasi) [14].

Proses canai panas kini semakin banyak diterapkan pada baja HSLA untuk menghasilkan sifat mekanis yang optimum setelah canai panas selesai [1]. Canai panas yang terkendali sangatlah penting untuk mendapatkan sifat mekanis yang dapat diandalkan dalam baja untuk berbagai macam aplikasi [1].

Dalam proses canai, reduksi ketebalan baja, r , dirumuskan sebagai berikut:

$$r = (h_1 - h_2)/h_1 = 1 - (h_2/h_1) \quad (2.3)$$

dengan h_1 menyatakan ketebalan sebelum dicanai dan h_2 menyatakan ketebalan setelah dicanai. Menurut Beynon dan Sellars [15], regangan yang dialami baja, ε , dirumuskan sebagai berikut:

$$\varepsilon = 1,155 \ln (h_1/h_2) = 1,155 \ln [1/(1 - r)] \quad (2.4)$$

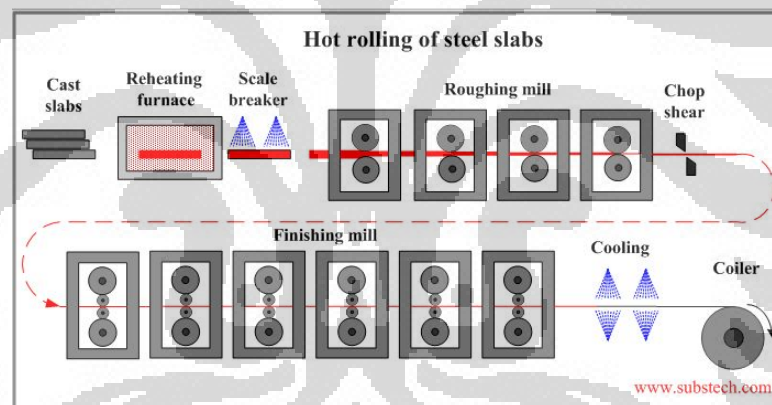
Sementara itu laju regangan, $\dot{\varepsilon}$, dirumuskan sebagai berikut [15]:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon \times v_R / \sqrt{[R(h_1 - h_2)]} \quad (2.5)$$

dengan v_R menyatakan kecepatan rol dan R menyatakan jari-jari rol.

Menurut Kern dkk [8], proses canai panas dapat dibagi menjadi lima tahap, yakni *heating*, *roughing*, *delay*, *finishing*, dan *cooling*. Berikut akan dijelaskan mengenai posisi kelima tahap tersebut dalam suatu proses canai panas.

Sebelum canai panas, baja terlebih dahulu dipanaskan ulang (tahap *heating*) hingga temperatur sekitar 1200-1250°C [16]. Setelah itu, barulah baja dapat dicanai panas (tahap *roughing*). Pada umumnya, canai panas dilakukan dalam lebih dari satu kali *passing*. Tenggang waktu antara dua *pass* ini disebut sebagai *delay*. Setelah *delay*, proses canai panas dapat diteruskan hingga tercapai ketebalan yang diinginkan setelah *passing* yang terakhir (tahap *finishing*). Karena temperatur baja terus menurun selama proses canai panas berlangsung, *finishing* dapat terjadi di wilayah dua fasa atau wilayah fasa ferrit [17]. Setelah *finishing*, baja lalu dapat didinginkan ke temperatur ruang dengan udara atau air (tahap *cooling*). Gambar 2.5 berikut ini memperlihatkan secara skematis kelima tahapan canai panas tersebut[18]:



Gambar 2.5 Kelima Tahap Canai Panas [18]

2.5 Proses-Proses Metalurgi Selama Proses Canai Panas

Ada banyak proses metalurgi yang terjadi selama canai panas dan pendinginan yang mengikutinya, yang akan menentukan ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh [8]. Mikrostruktur yang didapatkan sangat sensitif dengan kondisi canai panas [15]. Karena itu, variabel-variabel canai panas tersebut harus dikendalikan dengan ketat, sehingga melalui proses-proses metalurgi yang terjadi, dihasilkan butir ferrit berukuran halus.

Pada bagian ini, akan dijelaskan mengenai proses-proses metalurgi yang terjadi dalam setiap tahap dan pengaruh variabel-variabel canai panas di setiap tahap terhadap proses-proses metalurgi tersebut.

2.5.1 *Heating*

Tahap pertama dalam canai panas adalah *heating*. *Heating* menentukan temperatur dimulainya canai panas dan kelarutan unsur-unsur *microalloying*[19]. Dalam tahap ini, proses-proses metalurgi yang terjadi ialah austenisasi dan pertumbuhan butir. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut mengenai keduanya.

2.5.1.1 Austenisasi

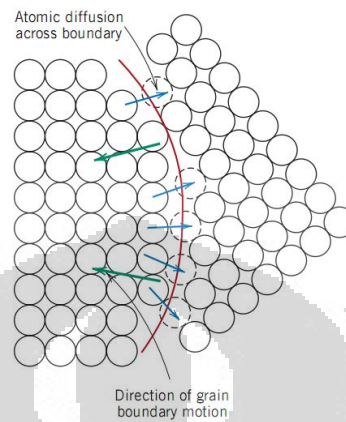
Sesuai dengan namanya, austenisasi merupakan proses transformasi fasa dari ferrit atau ferrit dan perlit menjadi austenit. Transformasi fasa ini dimulai pada temperatur Ar_1 dan mikrostruktur yang sepenuhnya austenitik tercapai pada temperatur Ar_3 , yang tidak sama dengan temperatur Ae_1 dan Ae_3 yang ditunjukkan dalam diagram fasa Fe-Fe₃C.

Selisih antara Ar_1 dan Ar_3 dengan Ae_1 dan Ae_3 dipengaruhi oleh laju pemanasan dan keberadaan unsur-unsur paduan [1]. Unsur-unsur paduan yang menstabilkan austenit akan menurunkan temperatur transformasi, dan sebaliknya unsur-unsur paduan yang menstabilkan ferrit akan meningkatkan temperatur transformasi. Pengaruh unsur-unsur paduan terhadap temperatur diakhirinya transformasi telah diperlihatkan dalam Persamaan 2.1.

2.5.1.2 Pertumbuhan Butir

Pertumbuhan butir adalah perubahan mikrostruktur karena gerakan batas butir yang disebabkan oleh pengurangan energi antarmuka batas butir [20]. Ketika butir bertambah besar, jumlah luas batas butir berkurang, sehingga jumlah energi antarmuka berkurang [2]. Tidak semua butir dapat membesar, namun butir yang besar akan tumbuh dengan mengorbankan butir yang kecil, sehingga ukuran

butir rata-rata meningkat dengan waktu [2]. Gambar 2.6 berikut ini menunjukkan secara skematis proses pertumbuhan butir.



Gambar 2.6 Pertumbuhan Butir [2]

Secara spesifik, pertumbuhan butir austenit dalam baja *microalloyed* dikendalikan antara lain oleh temperatur dan lamanya austenisasi, komposisi kimia, dan kelarutan dari karbonitrida [8, 20]. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut.

Pertumbuhan butir disebabkan oleh difusi jarak pendek atom-atom dari satu sisi batas butir ke batas lainnya [2]. Semakin tinggi temperatur austenisasi, maka dapat diperkirakan atom-atom akan berdifusi lebih cepat, sehingga pertumbuhan butir juga akan berlangsung lebih cepat. Dengan meningkatnya lama austenisasi, atom-atom memiliki lebih banyak waktu untuk berdifusi, sehingga pertumbuhan butir akan lebih ekstensif. Dalam kedua kasus, ukuran butir akhir akan lebih besar.

Unsur pepadu dalam baja, secara spesifik Nb, dapat menghambat pertumbuhan butir austenit karena *solute drag effect* [21]. *Solute drag effect* berhubungan dengan ketidakcocokan atomik (*atomic misfit*) antara austenit dengan unsur pepadu [22], yang dapat mempersulit difusi atom-atom Fe, sehingga pertumbuhan butir dapat diperlambat.

Terakhir, pertumbuhan butir austenit juga dipengaruhi oleh kelarutan dari karbonitrida. Unsur *microalloying* seperti Nb dapat membentuk partikel fasa kedua Nb(C, N) di batas butir yang dapat menghambat pertumbuhan butir, dengan cara mengerjakan tekanan pengunci (*pinning pressure*) pada batas butir [20, 23].

Namun demikian partikel tersebut akan larut dalam austenit dan mengalami pengkasaran partikel pada temperatur austenisasi yang terlalu tinggi, sebagai akibatnya terjadi pertumbuhan butir yang tidak terkendali [20]. Temperatur kelarutan presipitat tersebut diperlihatkan dalam persamaan berikut [20]:

$$\log[\text{Nb}][\text{C}]^{0.83}[\text{N}]^{0.14} = 4.46 - 9800/T \quad (2.6)$$

dengan [Nb], [C], dan [N] menyatakan persen berat dari masing-masing unsur, dan T menyatakan temperatur kelarutan presipitat dinyatakan dalam K.

Temperatur dan lama austenisasi berperan penting dalam menentukan ukuran butir austenit semula, yang kemudian menentukan jumlah *pass* yang dibutuhkan. Siwecki [19] mendapatkan, untuk ukuran butir austenit semula yang halus dibutuhkan 10 *pass* sebelum tercapai penghalusan butir, sementara untuk ukuran butir austenit semula yang kasar terjadi penghalusan butir yang kontinu pada tiap *pass*.

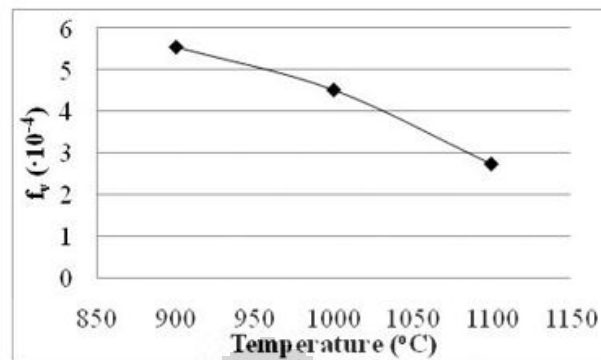
Priadi, Napitupulu, dan Siradj [20] mendapatkan persamaan untuk memprediksi ukuran butir austenit setelah austenisasi sebagai berikut ini:

$$0.17 \cdot r/f_v = d/2 \quad (2.7)$$

dengan r menyatakan ukuran partikel akhir rata-rata (cm) setelah austenisasi selama t detik, f_v menyatakan fraksi volume partikel, dan d menyatakan diameter butir austenit. Nilai r itu sendiri dapat dihitung dari persamaan berikut [20]:

$$r^3 - r_0^3 = [8 \cdot \sigma \cdot V \cdot D \cdot t \cdot X_s] / [9 \cdot R \cdot T] \quad (2.8)$$

dengan r_0 menyatakan ukuran partikel awal rata-rata (cm), σ menyatakan energi antarmuka, V menyatakan volume molar Nb(C, N), D menyatakan difusivitas Nb dalam austenit, t menyatakan lamanya austenisasi, X_s menyatakan kadar Nb yang larut dalam austenit, R menyatakan konstanta gas, dan T menyatakan temperatur mutlak. Gambar 2.7 berikut menunjukkan perubahan f_v dengan bertambahnya temperatur:



Gambar 2.7 Grafik f_v vs T [20]

2.5.2 *Roughing*

Tahap selanjutnya dalam proses canai panas ialah *roughing*. Pada tahap ini, baja dilewatkan diantara dua rol dengan lebar celah tertentu. Dalam industri, *roughing* dilakukan pada temperatur 1100°C-1250°C [24].

Pada tahap ini terjadi perubahan mikrostruktur selama baja dideformasi. Perubahan mikrostruktur ini disebabkan oleh tiga proses metalurgi yang terjadi, yakni pengerasan kerja, *dynamic recovery*, dan *dynamic recrystallization*. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut.

2.5.2.1 Pengerasan Kerja

Pengerasan kerja terjadi ketika baja dilewatkan diantara kedua rol dengan lebar celah rol yang lebih kecil dari tebal baja yang melewati rol tersebut. Tegangan tekan dari rol menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada baja. Secara makro, deformasi plastis ini menyebabkan terjadinya peningkatan beberapa sifat mekanis, seperti tegangan luluh, tegangan tarik, dan kekerasan. Oleh karena itu, baja dikatakan telah mengalami pengerasan kerja.

Ketika baja dicanai, baja mengalami pengerasan kerja jika tidak ada rekristalisasi dinamik [25]. Proses canai ini juga menyebabkan elongasi butir austenit [21].

Austenit yang mengalami pengerasan kerja mengandung berbagai macam cacat kristal, seperti dislokasi, pita deformasi, kembaran anil terdeformasi (*deformed annealing twins*), dan batas butir austenit yang seperti tangga (*ledge-*

like austenite grain boundaries) [21, 26, 27]. Kepadatan cacat-cacat ini, secara khusus dislokasi dan pita deformasi, akan bertambah dengan bertambah besarnya regangan/deformasi [28, 29] dan dengan semakin rendahnya temperatur deformasi [6].

Cacat-cacat kristal ini merupakan lokasi nukleasi bagi butir austenit hasil rekristalisasi atau nukleasi butir ferrit pada tahap *cooling*. Tanpa keberadaan cacat-cacat kristal tersebut, yang berperan sebagai lokasi nukleasi hanyalah batas butir austenit. Sebagai akibatnya, butir austenit hasil rekristalisasi atau butir ferrit dapat tumbuh mencapai ukuran yang lebih besar. Cacat-cacat kristal ini akan meningkatkan lokasi nukleasi tersebut, sehingga pertumbuhan butir austenit hasil rekristalisasi atau butir ferrit akan lebih terbatas, karena terhalangi oleh pertumbuhan butir-butir yang lain. Sebagai akibatnya, didapatkan ukuran butir yang lebih halus.

2.5.2.2 *Dynamic Recovery*

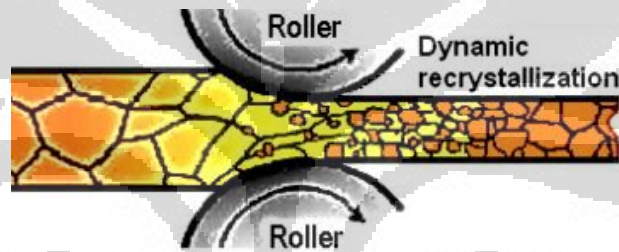
Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, proses canai meningkatkan kepadatan dislokasi dalam logam. Sebagian dari energi yang diberikan untuk deformasi ini disimpan sebagai energi regangan pada dislokasi-dislokasi yang baru terbentuk [2].

Namun ketika logam mengalami *recovery*, sebagian dari energi regangan yang tersimpan ini dilepaskan oleh pergerakan dislokasi. Sebagian dari dislokasi bertemu dan saling menghilangkan (anihilasi), sehingga terjadi penurunan jumlah dislokasi. Karena mudahnya difusi diri (*self diffusion*) pada temperatur tinggi, *recovery* berlangsung segera setelah dislokasi terbentuk akibat deformasi plastis [15].

Menurut Yoshie dkk [21], *recovery* dapat diperlambat dengan penambahan unsur Nb. Selain itu, menurut Zedeh dan Dunne [12], presipitasi dan efek penguncian (*pinning effect*) dari partikel NbC menghambat *recovery* secara signifikan.

2.5.2.3 Dynamic Recrystallization

Setelah *recovery* selesai, butir-butir masih banyak mengandung energi regangan sisa [2]. Perbedaan setempat dari energi regangan ini (karena kepadatan dislokasi yang tidak homogen) dapat nukleasikan butir-butir baru selama proses deformasi berlangsung [29]. Nukleasi butir-butir baru ini menghilangkan sangat banyak dislokasi dengan migrasi batas butir bersudut tinggi (*high-angle grain boundaries*) [29]. Inilah yang disebut dengan *dynamic recrystallization*. Butir-butir baru yang terbentuk ini bebas tegangan dan berbentuk *equiaxed* [2]. Gambar 2.8 berikut ini memperlihatkan secara skematis perubahan mikrostruktur yang diakibatkan oleh rekristalisasi dinamis:



Gambar 2.8 Rekristalisasi Dinamis [30]

Rekristalisasi inilah yang menyebabkan penghalusan ukuran butir austenit [31]. Penghalusan ukuran butir ini akan meningkatkan baik kekuatan maupun ketangguhan baja [5, 6]. Selain itu, menurut Samuel dkk [25], rekristalisasi dinamis menghasilkan ukuran butir austenit yang jauh lebih halus dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh rekristalisasi statik. Dengan demikian, rekristalisasi dinamis merupakan proses yang sangat menguntungkan dalam canai panas.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi rekristalisasi, seperti yang akan dijelaskan berikut ini.

Faktor pertama ialah regangan kritis [23]. Jika regangan yang dialami baja tidak melebihi suatu nilai kritis, maka tidak akan terjadi rekristalisasi dinamis. Regangan kritis ini dipengaruhi oleh ukuran butir austenit semula, semakin besar ukuran butir austenit semula, maka regangan kritis ini akan semakin tinggi [23]. Regangan kritis juga dipengaruhi oleh laju regangan dan temperatur deformasi [32]. Dan terakhir, regangan kritis dipengaruhi oleh fraksi volume presipitat yang

terbentuk, semakin tinggi fraksi volumenya, semakin tinggi regangan yang diperlukan sebelum rekristalisasi dapat dimulai [25].

Faktor kedua ialah “tenaga penggerak” [23]. “Tenaga penggerak” ini berasal dari tegangan sisa, yang disebabkan oleh peningkatan kepadatan dislokasi akibat deformasi plastis. Semakin besar tegangan sisa ini atau semakin besar perbedaan kepadatan dislokasi setempat, semakin cepat laju rekristalisasi [23]. Selain itu, regangan dan laju regangan yang lebih besar juga akan mendukung rekristalisasi, karena keduanya meningkatkan “tenaga penggerak” tersebut [33].

Faktor ketiga ialah ukuran butir [23, 33]. Butir austenit hasil rekristalisasi bernukleasi terutama pada batas butir austenit dan pertemuan tiga butir [23]. Ukuran butir yang lebih halus memberikan lokasi nukleasi yang lebih banyak, sehingga rekristalisasi akan berlangsung lebih cepat [33].

Faktor keempat ialah temperatur canai panas. Laju rekristalisasi akan meningkat dengan temperatur, namun pengaruh temperatur lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh faktor lainnya [33].

Faktor kelima ialah temperatur dimana rekristalisasi berhenti T_{nr} [8]. Jika austenit dideformasi dibawah temperatur ini, maka butir austenit hanya akan memipih, memanjang, mengalami pengerasan kerja, dan menghasilkan banyak cacat-cacat kristal [8, 21]. T_{nr} meningkat dengan bertambahnya ukuran butir austenit semula sebelum deformasi, dengan bertambahnya temperatur *heating*, dengan bertambahnya kandungan unsur *microalloying*, dan dengan berkurangnya regangan [8]. Selain itu, presipitasi NbC juga meningkatkan T_{nr} [34].

Menurut Yuan, dkk [35] temperatur ini dapat dihitung menurut persamaan berikut:

$$T_{nr} = (Ar_3 + Ac_3)/2 \quad (2.9)$$

Temperatur Ac_3 dapat dihitung dari Persamaan 2.2, sedangkan Ar_3 dapat dihitung dari persamaan berikut untuk baja Nb yang tidak dideformasi [35]:

$$Ar_3 = 370 \exp(-D_\gamma^{0.5}/6,7) - 325 R_c^{0.1} - 5649 [Nb] + 78194 [Nb]^2 + 1019 \quad (2.10)$$

dengan D_γ menyatakan ukuran butir austenit, R_c menyatakan laju pendinginan, dan $[Nb]$ menyatakan persen berat Nb dalam baja.

Faktor keenam ialah keberadaan unsur pepadu, secara spesifik Nb. Rekristalisasi dalam canai panas dipengaruhi oleh keberadaan unsur-unsur

microalloying, dan Nb dapat digunakan secara efektif dalam jumlah kecil sekaligus yang paling bermanfaat dalam prakteknya [21].

Dalam larutan padat, Nb dapat menghambat nukleasi, bukan pertumbuhan dari butir yang terekristalisasi [23] melalui *solute drag effect* [36]. Unsur-unsur pemuatan yang berada dalam larutan padat akan mempengaruhi energi aktivasi untuk rekristalisasi dinamik [37], sehingga rekristalisasi dapat dihambat.

Sementara itu, Nb dalam bentuk presipitat NbC atau NbCN dapat menghambat nukleasi dan pertumbuhan butir yang terekristalisasi [23] oleh presipitasi dan efek penguncian (*pinning effect*) pada batas butir [12].

Presipitat ini cenderung bernukleasi pada batas butir dan dislokasi, dan presipitasi ini dapat dipicu oleh regangan (*strain-induced precipitation*) [12]. Semakin besar regangan, maka presipitasi akan berlangsung lebih awal [15].

2.5.3 Delay

Setelah *roughing*, tahap selanjutnya dalam proses canai panas ialah *delay*. *Delay* merupakan jeda diantara dua proses *roughing*. Pada tahap ini terjadi perubahan mikrostruktur selama baja berada dalam keadaan tanpa beban. Perubahan mikrostruktur ini disebabkan oleh tiga proses metalurgi yang terjadi, yakni *static recovery*, *static recrystallization*, dan pertumbuhan butir. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut.

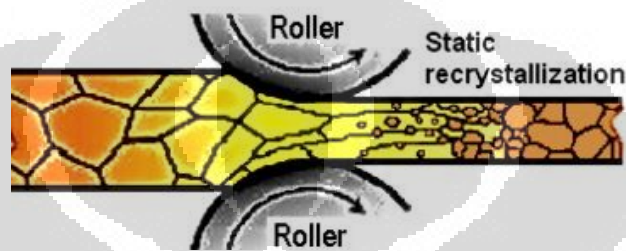
2.5.3.1 Static Recovery

Jika rekristalisasi tidak berlangsung sempurna diantara dua tahap *roughing*, butir yang belum terekristalisasi akan mengalami *static recovery* [18, 23]. *Static recovery* ini terjadi segera setelah beban dihilangkan [15]. Selama *static recovery*, atom-atom akan menyusun ulang dirinya sehingga terjadi relaksasi, baik itu relaksasi cacat titik, relaksasi dislokasi, dan relaksasi batas butir [38].

Static recovery dapat dihambat oleh keberadaan presipitat, dan penghambatannya dipengaruhi oleh fraksi volume presipitat dan jumlah tegangan semula [23].

2.5.3.2 Static Recrystallization

Dengan waktu yang cukup, *static recovery* akan diikuti dengan *static recrystallization* [15]. Rekristalisasi statik yang berulang-ulang pada temperatur yang lebih rendah menyebabkan penghalusan ukuran butir austenit [25]. Gambar 2.9 berikut ini memperlihatkan secara skematis perubahan mikrostruktur yang diakibatkan oleh rekristalisasi statis:



Gambar 2.9 Rekristalisasi Statik [30]

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi *static recrystallization*, seperti yang akan dijelaskan berikut ini.

Faktor pertama ialah regangan [19] dan laju regangan [25]. Regangan ini merupakan sumber “tenaga penggerak” untuk *static recrystallization*, dan “tenaga penggerak” ini ditentukan oleh regangan sebelumnya dan regangan sisa setelah *recovery*[19]. Regangan dan laju regangan yang lebih tinggi akan mendukung terjadinya *static recrystallization* [25].

Faktor kedua ialah ukuran butir austenit sebelumnya [15], semakin besar ukurannya maka *static recrystallization* akan semakin sulit berlangsung.

Faktor ketiga ialah kandungan unsur-unsur paduan [19, 25]. Pada umumnya, rekristalisasi statik menjadi lebih lambat dengan meningkatnya kandungan unsur paduan, namun ada perbedaan yang signifikan antara unsur-unsur yang berbeda [22]. Unsur paduan menghambat rekristalisasi melalui *solute drag* dan presipitasi, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya untuk rekristalisasi dinamis.

Faktor keempat ialah temperatur [19]. Sama seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, semakin tinggi temperatur maka rekristalisasi akan lebih mudah terjadi.

2.5.3.3 Pertumbuhan Butir

Jika rekristalisasi statik berlangsung sempurna, maka akan diikuti dengan pertumbuhan butir bahkan dalam jangka waktu *delay* yang relatif singkat [15].

Dalam artikel *review* yang ditulis oleh Senuma, Suehiro, dan Yada [32], pertumbuhan butir yang cepat setelah rekristalisasi selesai dapat disebabkan oleh dua hal. Pertama, dikarenakan oleh “tenaga penggerak” tambahan yang diberikan oleh dislokasi yang ada dalam butir yang terekristalisasi secara dinamis. Kedua, dikarenakan oleh distribusi ukuran butir yang lebih lebar setelah rekristalisasi, jika dibandingkan dengan setelah pertumbuhan butir. Sebagai akibat dari distribusi yang lebar ini, setelah rekristalisasi terdapat banyak butir halus. Butir-butir yang halus ini menghilang dengan cepat, dan dengan demikian pertumbuhan butir terlihat berlangsung lebih cepat.

2.5.4 *Finishing*

Pada dasarnya tahap *finishing* identik dengan *roughing*, dimana baja mengalami deformasi plastis. Perbedaannya terletak pada temperatur, dimana *finishing* pada umumnya dilakukan dibawah temperatur rekristalisasi. Dalam industri, biasanya *finishing* dilakukan pada temperatur 700-870°C [13].

Proses canai dibawah temperatur rekristalisasi menyebabkan butir austenit menjadi pipih, memanjang, dan mengalami pengerasan kerja [8] serta memberikan berbagai cacat kristal pada butir austenit [21]. Austenit yang terdeformasi ini hanya mengalami *recovery*, namun tidak mengalami rekristalisasi [6], sehingga banyak dari cacat kristal ini yang tersimpan dalam butir austenit [21].

Tahap *finishing* ini menentukan jumlah regangan yang terakumulasi, dan regangan ini menentukan ukuran butir ferrit akhir [39]. Semakin besar regangan yang tersisa, semakin banyak cacat-cacat kristal, sehingga semakin banyak lokasi bagi butir ferrit untuk bernukleasi. Akibatnya, ukuran butir ferrit akan semakin halus. Selain itu, temperatur *finishing* juga dapat mempengaruhi ukuran butir

ferrit akhir. Semakin tinggi temperatur *finishing* maka semakin besar ukuran butir ferrit akhir, meskipun pengaruhnya tidak signifikan [39].

2.5.5 *Cooling*

Cooling merupakan tahap terakhir dalam canai panas. Pada tahap ini terjadi transformasi fasa dari austenit menjadi ferrit atau ferrit dan perlit. Transformasi ini terjadi lebih cepat di permukaan karena laju pendinginan yang lebih tinggi [31]. Transformasi fasa yang terjadi akan menentukan ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh. Berikut ini akan dijelaskan mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh.

Faktor pertama ialah laju pendinginan. Semakin tinggi laju pendinginan, butir yang dihasilkan akan semakin halus [8]. Selain itu, semakin tinggi laju pendinginan, transformasi fasa menjadi tertunda karena temperatur transformasi menjadi lebih rendah [33, 38]. Namun pengaruh laju pendinginan menjadi lebih berkurang ketika regangan sisa bertambah [5, 40].

Yu dkk [38] menjelaskan bagaimana peningkatan laju pendinginan menghaluskan ukuran butir ferrit sebagai berikut. Semakin tinggi laju pendinginan, maka nukleasi butir ferrit akan semakin cepat, sehingga lokasi nukleasi butir ferrit dengan segera menjadi jenuh. Selanjutnya butir-butir ferrit yang sudah bernukleasi ini akan bertumbuh. Karena butir-butir ferrit yang bertumbuh ini saling bertabrakan satu dengan yang lain dan karena interferensi yang kuat diantara butir-butir ferrit yang bertumbuh, difusi atom-atom karbon dan unsur padu antara ferrit dengan austenit menjadi terhambat. Akibatnya laju pertumbuhan ferrit menjadi terhambat, sehingga ukuran butir menjadi lebih halus.

Faktor kedua ialah temperatur dimulainya tahap *cooling*. Semakin rendah temperatur ini, semakin besar ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh [40].

Faktor ketiga ialah komposisi kimia. Nukleasi dan pertumbuhan butir ferrit akan terhambat dengan meningkatnya kadar C dan Mn, sehingga ukuran butir ferrit yang didapatkan menjadi lebih halus [40]. Selain itu peningkatan kadar C menyebabkan temperatur transformasi turun ke wilayah dimana pertumbuhan

butir berlangsung lambat, dan dengan demikian didapatkan butir ferrit yang lebih halus [40].

Selain C, Nb juga dapat mempengaruhi ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh. Nb dalam larutan padat dapat menghambat transformasi austenit menjadi ferrit, tetapi penghambatan ini semakin lemah dengan berlangsungnya presipitasi [32]. Sementara itu, presipitat Nb yang terbentuk dapat berperan sebagai lokasi nukleasi ferrit, dan dapat mempercepat nukleasi butir ferrit [35]. Nukleasi yang lebih cepat tersebut menghasilkan ukuran butir ferrit yang lebih halus, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

Faktor keempat ialah ukuran butir austenit. Karena butir ferrit cenderung bernukleasi batas butir austenit, ukuran butir ferrit dapat diperhalus dengan memperhalus ukuran butir austenit, sebab hal ini menyediakan kepadatan lokasi nukleasi yang lebih tinggi [5]. Namun pengaruh penghalusan ukuran butir austenit menjadi semakin berkurang dengan meningkatnya regangan sisa [5].

Ukuran butir austenit yang kasar bersifat merugikan karena menyebabkan mikrostruktur hasil transformasi yang kasar dan tidak seragam [4, 5]. Mikrostruktur yang tidak seragam dapat berakibat buruk pada sifat mekanis, terutama ketangguhan, jika terdapat cukup banyak butir yang berukuran kasar [5].

Faktor kelima ialah regangan sisa pada austenit. Setelah canai panas, regangan sisa dapat tersimpan dalam austenit jika rekristalisasi tidak berlangsung sempurna, yang dapat meningkatkan energi deformasi yang tersimpan dan “tenaga penggerak” untuk transformasi ferrit [35, 41].

Menurut Hanlon, Sietsma, dan van der Zwaag [41], regangan sisa mempercepat transformasi fasa dengan cara mengurangi *undercooling* yang diperlukan untuk nukleasi ferrit, sehingga temperatur dimulai dan berakhirnya transformasi meningkat, rentang temperatur transformasi menjadi lebih sempit, dan pada akhirnya diperoleh ukuran butir ferrit yang halus.

Disamping itu, regangan sisa yang semakin besar meningkatkan jumlah cacat-cacat kristal yang berperan sebagai lokasi nukleasi butir ferrit, sehingga dihasilkan ukuran butir ferrit yang lebih halus. Regangan sisa ini semakin besar dengan meningkatnya kandungan Nb [35], laju pendinginan [35], deformasi, dan dengan berkurangnya temperatur deformasi, seperti dijelaskan berikut ini.

Peningkatan deformasi akan meningkatkan jumlah cacat-cacat kristal, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Peningkatan Nb, peningkatan laju pendinginan, dan pengurangan temperatur deformasi dapat menghambat *recovery* dan rekristalisasi, sehingga tidak terjadi pengurangan jumlah cacat-cacat kristal tersebut.

Namun jika austenit tidak terekristalisasi sempurna, maka akan didapatkan butir austenit yang halus karena rekristalisasi dan butir austenit yang kasar karena tidak terekristalisasi [23]. Hal ini tidak diinginkan, sebab setelah transformasi akan dihasilkan ukuran butir ferrit yang tidak seragam [23, 28]. Ukuran butir yang tidak seragam ini menimbulkan inhomogenitas sifat-sifat mekanis baja [23].

Menurut Matja dkk [42], temperatur dimulainya transformasi fasa dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_{\text{trans start}} = 830 - 19 R_c^{0,481} - 0,5 \exp ([0,042 D_\gamma + 7,8]/[2,11 + \varepsilon_\gamma]^{1,35}) \quad (2.11)$$

dengan $T_{\text{trans start}}$ menyatakan temperatur dimulainya transformasi, R_c menyatakan laju pendinginan, D_γ menyatakan ukuran butir austenit, dan ε_γ menyatakan jumlah regangan di butir austenit.

2.6 Persamaan Ukuran Butir Ferrit Hasil Canai Panas Baja HSLA

Penelitian-penelitian terdahulu telah menghasilkan hubungan kuantitatif antara ukuran butir ferrit hasil canai panas dengan ukuran butir austenit semula, temperatur canai panas, regangan, laju regangan, dan laju pendinginan. Menurut Bengochea, Lopez, dan Gutierrez [5]:

$$d_\alpha = (1 - 0,5\varepsilon^{0,47})(4,5 + 3Cr^{-0,5} + 13,4(1 - \exp(-0,015 d_\gamma))) \quad (2.12)$$

Menurut Siwecki [19]:

$$d_\alpha = d_\gamma / (1 + d_\gamma [D + E(dT/dt)^{0,5}]) \quad (2.13)$$

Menurut Samuel dkk [25]:

$$d_\alpha = -16 + 6,75d_\gamma^{0,8} + 3,65 Cr^{-0,15} + 5,6 (\exp(-\varepsilon))^{0,5} \quad (2.14)$$

Menurut Kvackaj dan Mamuzic [28]:

$$d_\alpha = 1,2919 Cr^{-0,1618} d_\gamma^{0,4364} \phi^{-0,3675} \quad (2.15)$$

Menurut Napitupulu [43] untuk kondisi tarik panas:

$$d_\alpha = 28,1d_\gamma^{0,5} \exp(Q/RT)^{-0,07} \varepsilon^{-0,07} \varepsilon^{-0,33} Cr^{-0,27} \quad (2.16)$$

Ukuran butir ferrit hasil tarik panas tersebut lalu dihubungkan dengan ukuran butir ferrit hasil canai panas dengan persamaan berikut [43]:

$$d\alpha_{\text{rol}} = 1,6452 \cdot d\alpha_{\text{tarik}}^{0.415} \varepsilon^{-0.785} T^{0.021} (1 - \{(Cr_1 + \Delta Cr)/Cr_1\} - 1) \quad (2.17)$$

dengan d_α menyatakan ukuran butir ferrit, d_γ menyatakan ukuran butir austenit, ε menyatakan regangan, Cr dan (dT/dt) menyatakan laju pendinginan, ΔCr menyatakan perbedaan laju pendinginan, ϕ menyatakan deformasi logaritmik, Q menyatakan energi aktivasi, R menyatakan tetapan gas, T menyatakan temperatur deformasi, $\dot{\varepsilon}$ menyatakan laju regangan, dan D dan E menyatakan konstanta yang dipengaruhi oleh komposisi kimia baja.

2.7 Mekanisme Penguatan Dalam Baja HSLA

Ada empat mekanisme penguatan yang bekerja dalam baja HSLA yang dicanai panas secara terkendali, yakni penguatan larutan padat, penghalusan butir, penguatan presipitat, dan pengerasan kerja [1, 3]. Keempat mekanisme ini bekerja bersama-sama untuk meningkatkan kekuatan dari baja HSLA. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut mengenai keempatnya.

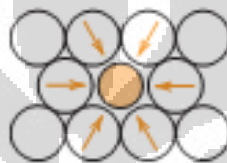
2.7.1 Penguatan Larutan Padat

Mekanisme penguatan yang pertama disebabkan oleh penambahan unsur-unsur paduan yang dapat membentuk larutan padat dengan baja. Ketika atom dari unsur-unsur tersebut larut dalam baja, perbedaan jari-jari atom unsur terlarut dengan jari-jari atom Fe menimbulkan tegangan kisi (*lattice strain*) pada atom-atom Fe disekitarnya. Tegangan kisi ini akan berinteraksi dengan tegangan yang terdapat disekitar dislokasi dan menghambat pergerakannya. Akibatnya secara makro sifat mekanis baja, seperti kekuatan luluh dan kekerasan, menjadi lebih baik.

Ada dua macam larutan padat yang dapat terbentuk dalam baja, yakni larutan padat interstisi dan larutan padat substitusi. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut mengenai keduanya.

2.7.1.1 Larutan Padat Interstisi

Larutan padat interstisi terbentuk ketika atom terlarut dapat tersisip masuk kedalam celah kisi kristal dari atom pelarut [3]. Hanya atom-atom berukuran kecil, seperti H, B, C, dan N, dengan jari-jari atomik jauh dibawah 1 nm, dapat membentuk larutan padat interstisi [3]. Dalam larutan padat interstisi, atom terlarut akan mengerjakan tegangan tarik pada atom-atom disekitarnya, seperti diperlihatkan secara skematis pada Gambar 2.10 berikut ini:



Gambar 2.10 Tegangan Kisi Disekitar Atom Interstisi [2]

2.7.1.2 Larutan Padat Substitusi

Larutan padat substitusi terbentuk ketika atom terlarut masuk dan menggantikan posisi dari atom-atom pelarut.

Dalam larutan padat substitusi, atom terlarut yang lebih besar akan mengerjakan tegangan tekan pada atom-atom disekitarnya, seperti diperlihatkan secara skematis pada Gambar 2.11 berikut ini:



Gambar 2.11 Tegangan Kisi Disekitar Atom Substitusi [2]

2.7.2 Penguatan Presipitat

Kekuatan baja dapat ditingkatkan lebih jauh dengan mengendalikan dispersi fasa lain dalam mikrostrukturnya [1]. Pada baja HSLA, fasa lain ini ada dalam rupa presipitat karbida, nitrida, atau karbonitrida; seperti NbC, AlN, VC, V(CN), TiC, dan Ti(CN) [3]. Presipitat ini biasanya jauh lebih kuat dan keras dari baja,

sehingga keberadaannya meskipun dalam fraksi volume yang kecil dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Tetapi presipitat ini berdampak buruk terhadap keuletan dan ketangguhan baja [1].

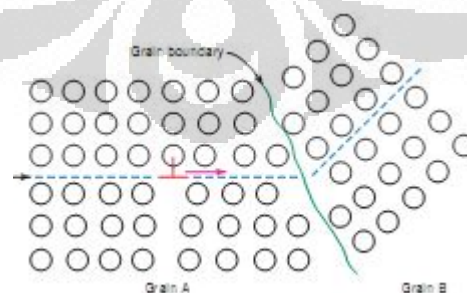
2.7.3 Pengerasan Kerja

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, deformasi plastis meningkatkan jumlah dislokasi dalam baja. Sebagai akibatnya, jarak antara dislokasi semakin dekat [2], sehingga interaksi antara dislokasi semakin kuat. Pada umumnya, interaksi ini bersifat saling tolak, sehingga dislokasi menjadi lebih sulit bergerak. Pada skala makro, logam menjadi lebih sulit dideformasi lebih jauh. Inilah yang disebut dengan pengerasan kerja.

2.7.4 Penghalusan Butir

Penghalusan butir merupakan mekanisme penguatan yang paling penting dalam baja HSLA [6]. Penghalusan butir akan meningkatkan sifat mekanis baja, seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, kekerasan, dan ketangguhan.

Jika butir semakin halus, luas wilayah batas butir menjadi lebih banyak. Sementara itu, dislokasi dalam suatu butir sangat sulit bergerak melewati batas butir. Dengan demikian, jika butir semakin halus, semakin banyak halangan bagi dislokasi untuk bergerak. Sehingga pada skala makro, material menjadi lebih kuat. Gambar 2.12 berikut ini memperlihatkan secara skematis bagaimana batas butir dapat menghalangi pergerakan dislokasi:



Gambar 2.12 Penghalangan Pergerakan Dislokasi Oleh Batas Butir [2]

Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan luluh material diperlihatkan dalam Persamaan Hall-Petch, seperti yang diperlihatkan berikut:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{0.5} \quad (2.18)$$

dengan σ_y menyatakan tegangan luluh, d menyatakan diameter butir, dan k_y dan σ_0 menyatakan konstanta. Dari hasil penelitiannya Yoshie dkk [21] memodifikasi Persamaan 2.18 menjadi bentuk seperti berikut ini:

$$\sigma_y = \sigma_0 + 1,72 d^{0.5} + 4,55 \quad (2.19)$$

Masih menurut Yoshie dkk [21], σ_0 terdiri dari penjumlahan lima suku seperti diperlihatkan berikut ini:

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{const}} + \sigma_{\text{int}} + \sigma_{\text{sub}} + \sigma_{\text{ppt}} + \sigma_{\text{disl}} \quad (2.20)$$

dengan σ_{const} menyatakan konstanta, σ_{int} menyatakan penguatan karena larutan padat interstisi, σ_{sub} menyatakan penguatan karena larutan padat substitusi, σ_{ppt} menyatakan penguatan karena presipitat, dan σ_{disl} menyatakan penguatan karena peningkatan jumlah dislokasi. Persamaan 2.20 ini memperlihatkan pengaruh dari berbagai mekanisme penguatan yang bekerja dalam baja HSLA seperti yang telah dijelaskan sebelumnya terhadap peningkatan tegangan luluhnya.

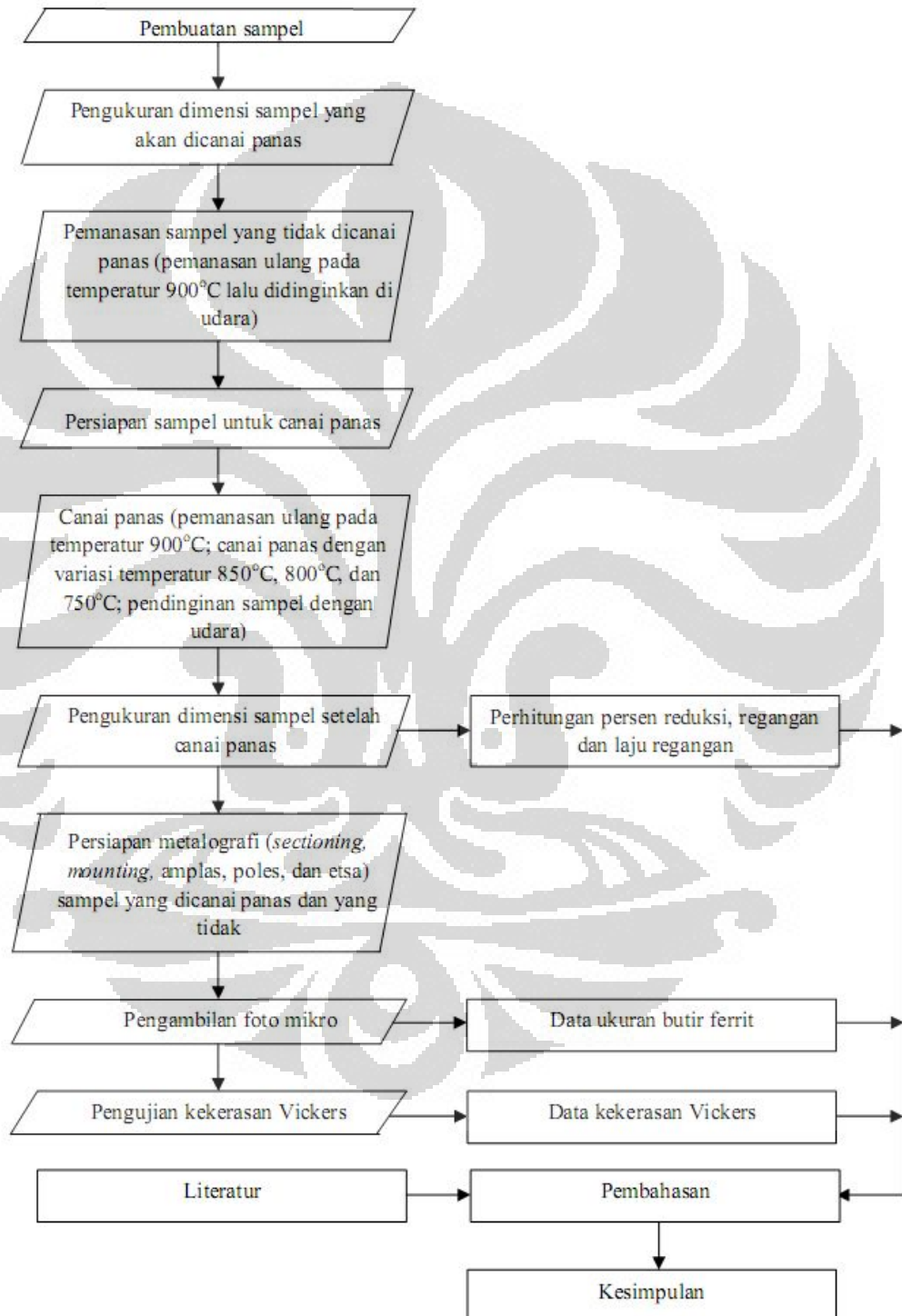
Berdasarkan persamaan yang telah dikompilasi oleh Majta [7], tegangan luluh dapat dihubungkan dengan kekerasan Vickers sebagai berikut:

$$HV = 0,378(YS + 123) \quad (2.21)$$

dengan HV menyatakan kekerasan Vickers dan YS menyatakan kekuatan luluh. Dari Persamaan 2.19 terlihat secara implisit bahwa penghalusan ukuran butir ferrit juga akan meningkatkan kekerasan Vickers dari baja.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Mesin bor
2. Termokopel
3. Termometer digital
4. Jangka sorong
5. Gergaji
6. *Inverter*
7. Palu
8. Pasak
9. Tang
10. Mesin canai
11. *Furnace*
12. Mesin pemotong
13. Gerinda
14. Spidol
15. Kamera
16. Alat amplas manual
17. Mesin poles
18. Botol semprot
19. Mikroskop optik dengan kamera
20. Alat uji kekerasan Vickers

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Resin
2. *Hardener*

3. Kertas amplas *grit* 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000
4. Kain beludru
5. Air
6. TiO₂
7. Alkohol
8. Asam nitrat (HNO₃) pekat
9. Asam sulfat (H₂SO₄) pekat
10. Asam oksalat (H₂C₂O₄)
11. Hidrogen peroksida (H₂O₂) 30%

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja HSLA ASTM A572 dengan komposisi kimia seperti diperlihatkan dalam Tabel 3.1 berikut [43]:

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Baja HSLA ASTM A572 [43]

Unsur	Kadar (%)
C	0,0085
Si	0,222
Mn	1,45
Nb	0,028
Al	0,049
Cu	0,045
Cr	< 0,003
P	< 0,003
S	< 0,003
Ni	< 0,005
Mo	< 0,005
V	< 0,002
Ti	< 0,002
Fe	98,141

3.3.2 Perlakuan Sampel yang Tidak Dicanai Panas

Sampel yang tidak dicanai panas dipanaskan ulang hingga 700°C dalam waktu 65 menit lalu ditahan selama 5 menit, kemudian dilanjutkan dengan pemanasan hingga 900°C dalam waktu 40 menit lalu ditahan selama 3 menit. Kemudian sampel didinginkan di udara. Perlakuan ini bertujuan untuk mendapatkan ukuran butir ferrit dan kekerasan Vickers yang dapat diperbandingkan dengan sampel yang dicanai panas.

3.3.3 Persiapan Sampel yang Akan Dicanai Panas

Ada tiga sampel yang dicanai panas dalam penelitian ini. Sebelum dilakukan canai panas, keempat sampel dibentuk sedemikian rupa dengan proses permesinan, sehingga sampel memiliki ketebalan yang semakin bertambah dari depan ke belakang.

Selanjutnya, dipilih empat titik secara acak dari bagian tengah hingga bagian belakang setiap sampel. Hal ini bertujuan untuk memastikan keempat titik yang dipilih mengalami regangan yang signifikan untuk mencapai penghalusan butir. Keempat titik ini lalu digurat dengan gergaji. Keempat titik inilah yang kemudian akan dipersiapkan untuk metalografi. Kemudian panjang dan lebar sampel diukur dengan jangka sorong sebanyak tiga kali, tetapi tebal sampel diukur hanya sekali pada keempat titik yang telah dipilih tersebut. Gambar 3.2 berikut memperlihatkan sampel yang sudah digurat.



Gambar 3.2 Sampel Yang Sudah Digurat

Terakhir, sampel dilubangi dengan bor pada sisi belakang untuk memasukkan termokopel tipe K. Setelah termokopel dimasukkan, lubang ditutup rapat dengan dipukul menggunakan pasak dan palu. Lalu termokopel disambungkan ke termometer digital. Gambar 3.3 berikut menunjukkan termometer digital yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.3 Termometer Digital

3.3.4 Canai Panas

Proses canai panas diawali dengan pemanasan ulang sampel. Sampel dipanaskan hingga 700°C dalam waktu 65 menit lalu ditahan selama 5 menit, kemudian dilanjutkan dengan pemanasan hingga 900°C dalam waktu 40 menit lalu ditahan selama 3 menit. Setelah temperatur tersebut dicapai, sampel didinginkan di udara terbuka hingga tercapai temperatur canai panas yang telah ditentukan, yakni 850°C , 800°C , atau 750°C . Ketika temperatur tersebut tercapai, sampel langsung dicanai panas. Untuk memperlambat kecepatan putar rol, maka pada mesin canai dipasang *inverter*. Gambar 3.4, 3.5, dan 3.6 berikut menunjukkan mesin canai, *furnace*, dan *inverter* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.4 Mesin Canai



Gambar 3.5 *Furnace*



Gambar 3.6 *Inverter*

Dalam penelitian ini, canai panas dilakukan dengan lebar celah rol konstan sebesar 2,4 mm dan dengan frekuensi arus AC sebesar 40 Hz. Pada frekuensi arus AC yang demikian, didapatkan kecepatan putar rol sebesar 137 mm/s. Setelah canai panas, seluruh sampel didinginkan di udara. Gambar 3.7 berikut menunjukkan sampel setelah canai panas.



Gambar 3.7 Sampel Setelah Canai Panas

Setelah dicanai panas, dimensi sampel kembali diukur dengan jangka sorong dan dirata-ratakan untuk menghitung besar reduksi pada keempat titik.

3.3.5 Persiapan Metalografi dan Pengambilan Foto Mikro

Persiapan metalografi dan pengambilan foto mikro dilakukan pada sampel yang dicanai panas dan yang tidak dicanai panas. Persiapan metalografi diawali dengan memotong setiap sampel hasil canai panas menjadi empat. Secara keseluruhan ada 13 sampel yang dipersiapkan untuk pengambilan foto mikro.

Setelah dipotong, sampel di-*mounting* untuk mempermudah penanganannya, kemudian diampas, dipoles secara mekanik, dan dietsa secara kimiawi. Etsa dilakukan dengan nital 3%, lalu dilanjutkan dengan reagen Marshall. Gambar 3.8, 3.9, dan 3.10 berikut menunjukkan sampel yang sudah di-*mounting*, alat ampas, dan mesin poles yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.8 Sampel Yang Sudah Di-mounting



Gambar 3.9 Alat Amplas Manual



Gambar 3.10 Mesin Poles

Setelah dietsa, sampel difoto mikro pada bagian yang dekat dengan bagian yang telah digurat sebelumnya dengan gergaji. Foto mikro diambil menggunakan mikroskop optik digital dengan perbesaran 1000X. Gambar 3.11 berikut ini memperlihatkan mikroskop optik digital yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.11 Mikroskop Optik Digital

3.3.6 Perhitungan Ukuran Butir Ferrit

Perhitungan ukuran butir ferrit dilakukan menggunakan metode Heyn dengan mengacu pada standar ASTM E112 [44]. Dalam metode ini, digunakan tiga buah lingkaran konsentrik dengan jumlah keliling sebesar 500 mm.

Untuk menghitung ukuran butir ferrit, pertama-tama ketiga lingkaran tersebut ditumpangkan diatas foto mikro yang diperoleh. Kemudian dihitung jumlah butir yang dipotong oleh ketiga lingkaran, N ; atau jumlah batas butir yang dipotong oleh ketiga lingkaran, P . Kemudian perpotongan linear rata-rata, l , dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$l = L/MN = L/MP \quad (3.1)$$

dengan L menyatakan jumlah keliling dari ketiga lingkaran konsentris yang digunakan, yakni 500 mm, dan M menyatakan perbesaran yang digunakan. Kemudian, ukuran butir ASTM, G , dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$G = (-6,644 \log l) - 3,288 \quad (3.2)$$

Nilai G yang telah diperoleh kemudian dibandingkan dengan Tabel 3.2 berikut ini [44] untuk mendapatkan ukuran butir rata-rata.

Tabel 3.2 Hubungan Ukuran Butir ASTM dengan Ukuran Butir Rata-Rata [44]

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8085	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Untuk mendapatkan hasil yang akurat, perhitungan ukuran butir dilakukan pada 8 foto mikro dari setiap sampel. Hasil yang didapat dari 8 foto kemudian dirata-ratakan dan simpangan bakunya dihitung dengan persamaan berikut:

$$s = (\Sigma(d - d_i)^2 / N - 1)^{0.5} \quad (3.3)$$

dengan s menyatakan simpangan baku, d menyatakan ukuran butir rata-rata, d_i menyatakan ukuran butir yang diperoleh untuk foto ke i ($i = 1-8$), dan N menyatakan jumlah foto yang dihitung ($N = 8$).

3.3.7 Pengujian Kekerasan Vickers

Setelah pengambilan foto mikro, selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan Vickers. Pengujian kekerasan ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM E92 [45]. Gambar 3.12 berikut ini menunjukkan alat uji kekerasan Vickers yang dipergunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.12 Alat Uji Kekerasan Vickers

Dalam penelitian ini, indentasi dilakukan selama 5 detik dengan beban indentasi sebesar 300 gf. Setelah indentasi selesai, dilakukan pengukuran kedua diagonal hasil indentasi lalu dirata-ratakan. Kemudian kekerasan Vickers dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$HVN = 1854P/d^2 \quad (3.4)$$

dengan HVN menyatakan kekerasan Vickers, P menyatakan beban indentasi yang digunakan, yakni 300 gf, dan d menyatakan diagonal rata-rata hasil indentasi dalam μm . Untuk mendapatkan hasil yang akurat, indentasi dilakukan sebanyak 5 kali untuk masing-masing sampel.

Hasil yang didapat dari 5 indentasi kemudian dirata-ratakan dan simpangan bakunya dihitung dengan persamaan berikut:

$$s = (\sum(HVN - HVN_i)^2 / N - 1)^{0,5} \quad (3.5)$$

dengan s menyatakan simpangan baku, HVN menyatakan kekerasan Vickers rata-rata, HVN_i menyatakan kekerasan Vickers pada indentasi ke i ($i = 1-5$), dan N menyatakan jumlah indentasi yang dibuat ($N = 5$).

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data

4.1.1 Data Perlakuan Sampel

Tabel 4.1 berikut ini menunjukkan detail dari proses canai panas yang dialami setiap sampel, meliputi temperatur *heating* dan temperatur canai panas. Canai panas pada semua sampel dilakukan dengan lebar celah rol sebesar 2,4 mm. Setelah canai panas, seluruh sampel didinginkan di udara.

Tabel 4.1 Data Perlakuan Sampel

Sampel No.	Kecepatan Rol (mm/s)	Temperatur <i>Heating</i> (°C)	Temperatur Canai (°C)
4	137	900	800
5	137	900	750
7	137	900	850

4.1.2 Data Ketebalan Sampel

Tabel 4.2 berikut ini menunjukkan tebal setiap titik yang telah dipilih pada keempat sampel. Pengukuran ketebalan dilakukan dua kali pada setiap titik, yakni sebelum dan sesudah dicanai panas, dengan jangka sorong. Kemudian, ketebalan sampel yang diukur setelah canai panas dirata-ratakan untuk mendapatkan tebal akhir.

Tabel 4.2 Ketebalan Sampel Sebelum dan Sesudah Canai Panas

Sampel No.	Titik ke-	Tebal Awal (mm)	Tebal Akhir (mm)	Perubahan Tebal (mm)
4	1	4,00	3,01	0,99
	2	4,30		1,29
	3	5,28		2,27
	4	5,60		2,59
5	1	4,16	2,99	1,17
	2	4,78		1,79
	3	5,52		2,53
	4	5,74		2,75
7	1	4,30	2,94	1,36
	2	4,90		1,96
	3	5,50		2,56
	4	5,86		2,92

4.1.3 Data Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan

Tabel 4.3 berikut ini menunjukkan data reduksi, regangan, dan laju regangan. Perhitungan ketiga besaran ini dilakukan dengan Persamaan 2.3-2.5.

Tabel 4.3 Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan Setiap Titik Dalam Sampel

Sampel No.	Titik ke-	Reduksi	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (1/s)
4	1	0,249	0,330	6,285
	2	0,301	0,414	6,912
	3	0,431	0,651	8,200
	4	0,463	0,719	8,480
5	1	0,281	0,381	6,692
	2	0,374	0,542	7,696
	3	0,458	0,708	8,457
	4	0,479	0,753	8,627
7	1	0,316	0,439	7,152
	2	0,400	0,590	8,007
	3	0,465	0,723	8,585
	4	0,498	0,797	8,861

4.1.4 Foto Struktur Mikro Sampel

Gambar 4.1-4.4 berikut ini menunjukkan foto struktur mikro sampel yang belum dan yang sudah dicanai panas. Untuk sampel yang dicanai panas, pengambilan foto dilakukan sedekat mungkin dengan daerah yang telah digurat sebelumnya. Sementara itu, pengambilan foto struktur mikro sampel yang tidak dicanai panas dilakukan secara acak di seluruh permukaan sampel. Seluruh foto diambil pada perbesaran 1000X. Pada gambar 4.2-4.4 diperlihatkan lokasi pengambilan tiap foto relatif terhadap sampel yang dicanai panas, dengan tidak berdasarkan skala.

4.1.4.1 Foto Struktur Mikro Sampel yang Tidak Dicanai Panas

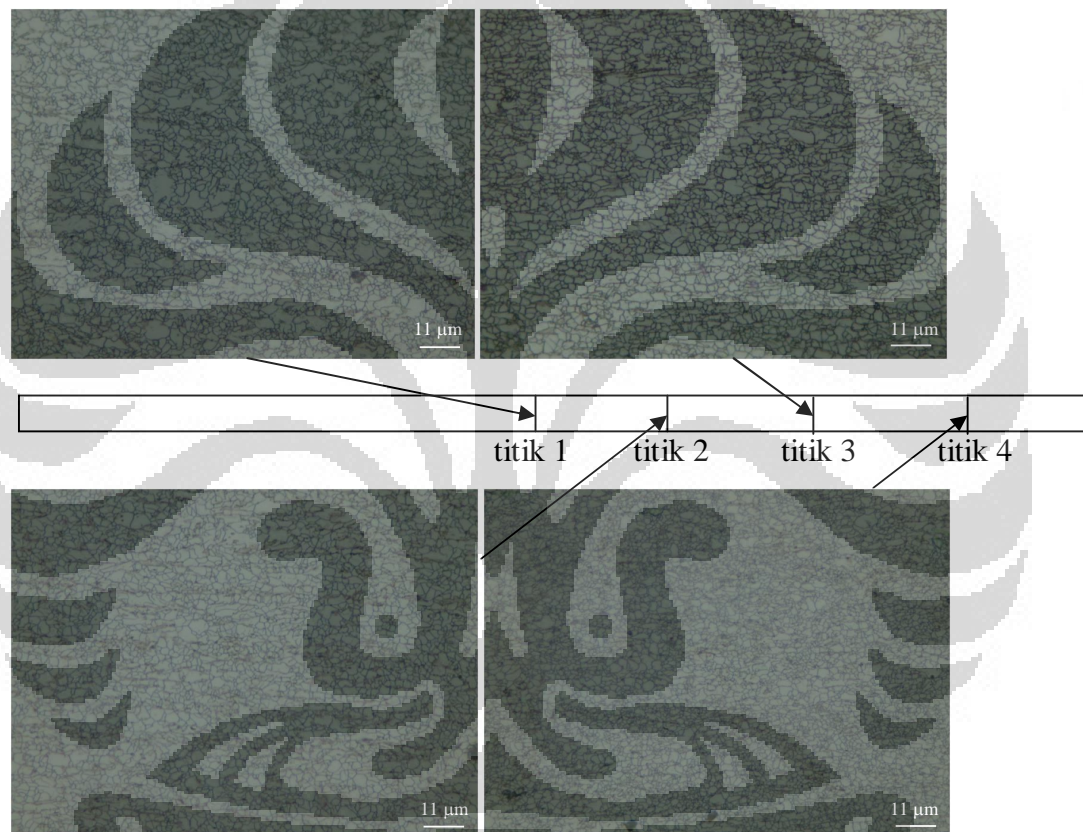
Gambar 4.1 berikut ini menunjukkan contoh foto struktur mikro dari sampel yang tidak dicanai panas.



Gambar 4.1 Foto Struktur Mikro Sampel yang Tidak Dicanai Panas

4.1.4.2 Foto Struktur Mikro Sampel 4 (Temperatur *Heating* 900°C, Temperatur Canai 800°C)

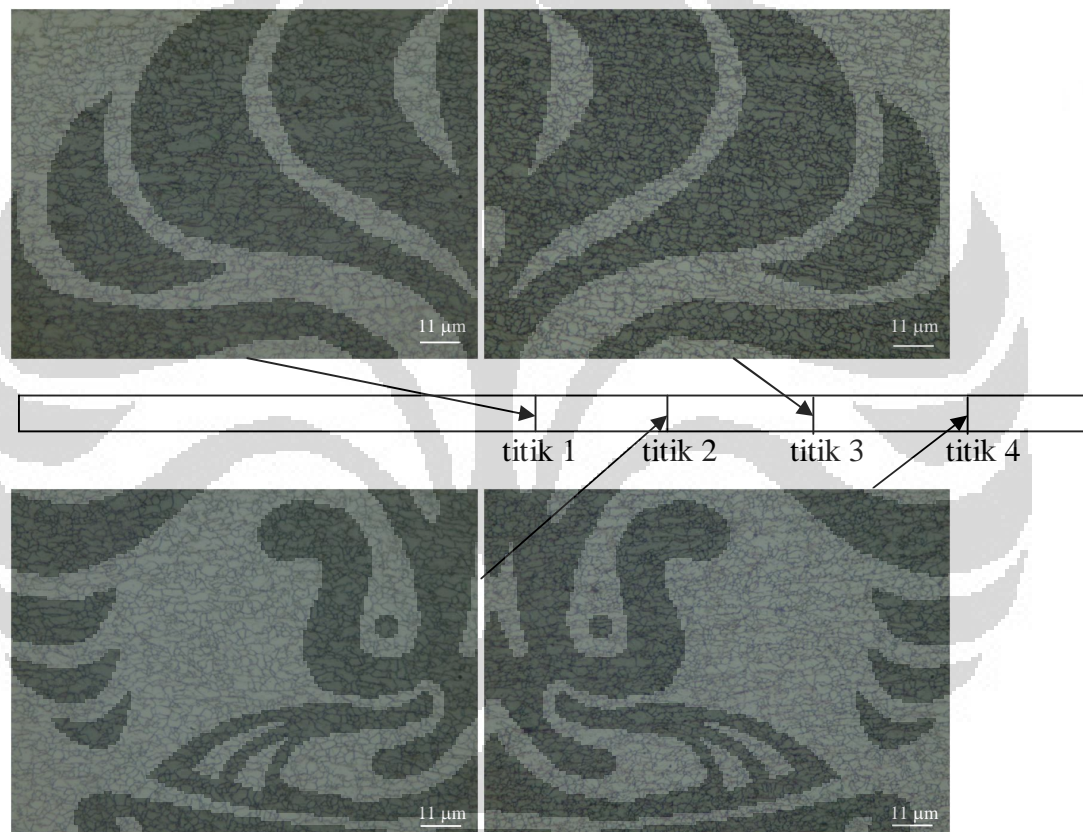
Gambar 4.2 berikut ini menunjukkan foto struktur mikro dari sampel 4, yang diambil pada empat titik yang berbeda. Pada gambar dibawah juga diperlihatkan lokasi pengambilan tiap foto struktur mikro relatif terhadap panjang sampel.



Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Sampel 4 Pada Empat Titik Yang Berbeda

4.1.4.3 Foto Struktur Mikro Sampel 5 (Temperatur *Heating* 900°C, Temperatur Canai 750°C)

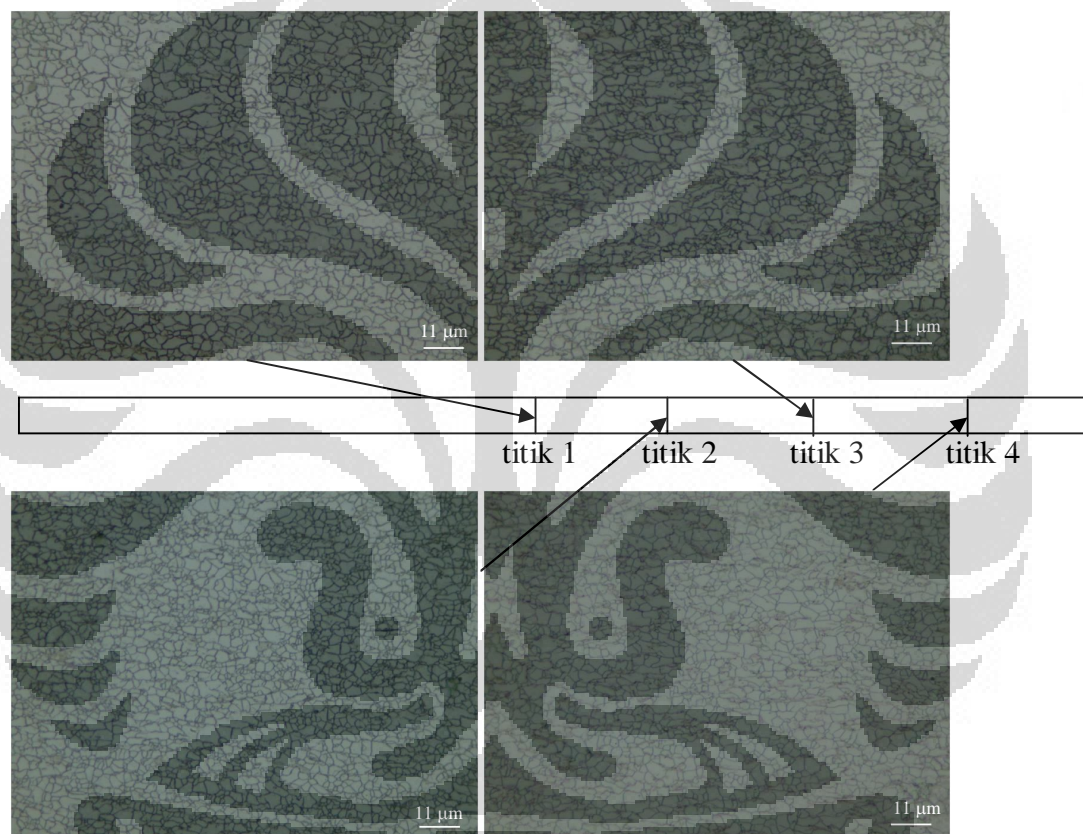
Gambar 4.3 berikut ini menunjukkan foto struktur mikro dari sampel 5, yang diambil pada empat titik yang berbeda. Pada gambar dibawah juga diperlihatkan lokasi pengambilan tiap foto struktur mikro relatif terhadap panjang sampel.



Gambar 4.3 Foto Struktur Mikro Sampel 5 Untuk Keempat Titik Yang Berbeda

4.1.4.4 Foto Struktur Mikro Sampel 7 (Temperatur *Heating* 900°C, Temperatur Canai 850°C)

Gambar 4.4 berikut ini menunjukkan foto struktur mikro dari sampel 7, yang diambil pada empat titik yang berbeda. Pada gambar dibawah juga diperlihatkan lokasi pengambilan tiap foto struktur mikro relatif terhadap panjang sampel



Gambar 4.4 Foto Struktur Mikro Sampel 7 Untuk Keempat Titik Yang Berbeda

4.1.5 Data Ukuran Butir Ferrit

Tabel 4.4 berikut ini menunjukkan ukuran butir ferrit pada sampel yang telah dicanai. Ukuran butir ferrit ini diperoleh dari hasil perhitungan dengan metode Heyn, dengan mengacu pada standar ASTM E112 [44].

Dari tabel 3.2 dapat dilihat bahwa penentuan ukuran butir berdasarkan data-data yang tercantum dalam tabel hanya dapat dilakukan hingga ukuran butir

ASTM $G = 14$ saja. Sementara itu dari hasil perhitungan, didapatkan nilai $G > 14$ pada sebagian besar sampel.

Untuk itu, perlu dibuat suatu persamaan yang mengkorelasikan antara ukuran butir ASTM, G , dengan ukuran butir rata-rata, d untuk rentang ukuran butir ASTM yang didapatkan dari percobaan. Persamaan ini dibuat dengan memasukkan nilai G dan d dari tabel 3.2, untuk $G = 13, 13,5, \text{ dan } 14$. Untuk rentang G tersebut, ditemukan bahwa persamaan yang memberikan hasil paling mendekati tabel 3.2 adalah persamaan dalam bentuk berikut:

$$d = 9,201 \times 10^5 G^{-4,81} \quad (4.1)$$

Selanjutnya, perhitungan ukuran butir rata-rata d dari ukuran butir ASTM G dilakukan dengan persamaan tersebut untuk seluruh sampel yang dicanai panas, juga untuk $G > 14$. Akan tetapi sampel yang tidak dicanai panas memiliki ukuran butir ASTM G diantara 12.5-13, sehingga perhitungan ukuran butir rata-ratanya dapat dilakukan dengan interpolasi.

Tabel 4.4 Regangan, Laju Regangan, dan Ukuran Butir Ferrit Pada Sampel

Sampel No.	Titik ke-	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	d_α (μm)
4	1	0,330	6,285	$2,415 \pm 0,052$
	2	0,414	6,912	$2,278 \pm 0,065$
	3	0,651	8,200	$2,180 \pm 0,116$
	4	0,719	8,480	$1,905 \pm 0,061$
5	1	0,381	6,692	$2,465 \pm 0,044$
	2	0,542	7,696	$2,196 \pm 0,091$
	3	0,708	8,457	$2,079 \pm 0,104$
	4	0,753	8,627	$1,895 \pm 0,078$
7	1	0,439	7,152	$3,021 \pm 0,196$
	2	0,590	8,007	$2,775 \pm 0,066$
	3	0,723	8,585	$2,768 \pm 0,081$
	4	0,797	8,861	$2,534 \pm 0,141$
Tidak Dicanai	–	–	–	$4,388 \pm 0,073$

4.1.6 Data Kekerasan Vickers

Tabel 4.5 berikut ini menunjukkan kekerasan Vickers dari seluruh sampel, baik yang dicanai panas maupun yang tidak.

Tabel 4.5 Kekerasan Vickers Seluruh Titik Dalam Sampel

Sampel No.	Titik ke-	HVN
4	1	182,925± 4,078
	2	185,993± 5,606
	3	190,107± 4,738
	4	197,264± 1,016
5	1	197,337± 4,925
	2	201,054± 2,866
	3	204,921± 2,238
	4	207,711± 2,856
7	1	175,514± 3,392
	2	180,919± 2,671
	3	182,890± 2,520
	4	189,395± 4,319
Tidak Dicanai	–	157,450± 4,547

4.2 Pembahasan Data Ukuran Butir Ferrit

4.2.1 Pembahasan Canai Panas dan Mikrostruktur yang Diperoleh

Telah dilakukan canai panas pada baja HSLA-0,028% Nb untuk mendapatkan hubungan kuantitatif antara variabel-variabel operasional canai panas terhadap ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh.

Pertama-tama, seluruh sampel diaustenisasi pada temperatur 900°C. Temperatur Ac_3 untuk baja ini dapat dihitung dari komposisi kimianya menggunakan Persamaan 2.2 [10]:

$$Ac_3 = 910 - 203 \sqrt{0,0085 + 44,7(0,222) - 15,2(0,001) + 31,5(0,001) + 104(0,001)}$$

$$Ac_3 = 901,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

Dari perhitungan dapat dilihat bahwa $T_{\text{heating}} \approx A_{c3}$, sehingga baja dapat diasumsikan telah teraustenisasi pada temperatur 900°C .

Setelah austenisasi, seluruh sampel didinginkan di udara hingga mencapai temperatur canai yang telah ditetapkan. Temperatur A_{r3} dari baja ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.10 [35]. Dari penelitian Napitupulu [43], untuk kondisi yang hampir sama dengan kondisi yang digunakan dalam penelitian ini, didapatkan $D_{\gamma} = 5,37 \mu\text{m}$ dan $Cr = 2,8^{\circ}\text{C/s}$. Dengan memasukkan angka-angka tersebut kedalam persamaan, didapatkan:

$$\begin{aligned} A_{r3} &= 370 \exp(-5,37^{0,5}/6,7) - 325 (2,8)^{0,1} - 5649 (0,028) + 78194 (0,028)^2 + 1019 \\ A_{r3} &= 823,7^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Selain itu menurut Napitupulu [43], temperatur A_{r1} untuk baja ini ialah 723°C .

Dari temperatur A_{r3} dan A_{r1} dapat disimpulkan bahwa deformasi dilakukan pada daerah berfasa austenit untuk sampel 7 (canai panas pada temperatur 850°C) dan dilakukan pada daerah dua fasa (austenit dan ferrit) untuk sampel 4 dan 5 (canai panas pada temperatur 800°C dan 750°C).

Dari hasil perhitungan ukuran butir, terlihat sampel yang telah dicanai memiliki ukuran butir ferrit yang lebih halus dibandingkan dengan sampel yang tidak, seperti dapat dilihat pada Tabel 4.4. Selain itu, pada sampel yang tidak dicanai, terlihat adanya partikel-partikel fasa kedua di batas butir, namun fasa kedua tersebut tidak terlihat di batas butir dari sampel yang dicanai. Hal ini dapat disebabkan oleh penyebaran fasa kedua tersebut akibat proses canai. Selain itu hal ini juga dapat dikarenakan pada sampel yang dicanai, pengetsaan memberikan batas butir yang lebih tajam dibandingkan dengan sampel yang tidak dicanai. Akibatnya, keberadaan fasa kedua di batas butir tersebut menjadi tidak terlihat.

Dari foto struktur mikro dapat dilihat bahwa butir-butir ferrit pada setiap titik dalam ketiga sampel cenderung terorientasi sesuai dengan arah canai. Struktur mikro yang demikian menandakan bahwa sampel tidak mengalami rekristalisasi, karena seluruh sampel dideformasi dibawah temperatur rekristalisasi austenit. Hal ini dapat dikonfirmasi dengan menghitung temperatur rekristalisasi austenit menggunakan Persamaan 2.9 [35]:

$$\begin{aligned} T_{nr} &= (823,7^{\circ}\text{C} + 901,3^{\circ}\text{C})/2 \\ T_{nr} &= 862,5^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (4.4)$$

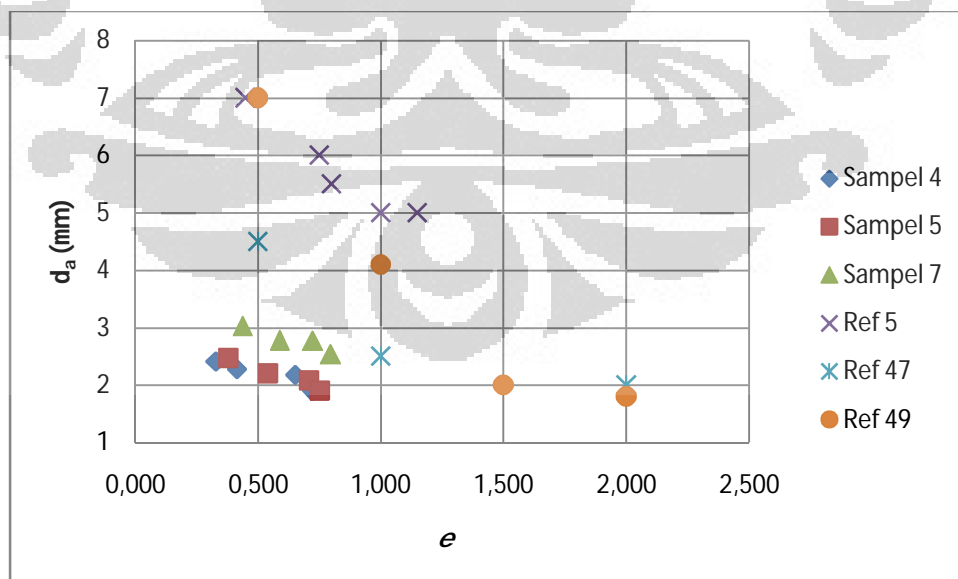
Dari foto juga terlihat bahwa dengan semakin rendahnya temperatur canai dan dengan semakin besarnya regangan, elongasi butir ferrit menjadi semakin jelas. Hal ini memperlihatkan bahwa regangan dan temperatur canai akan mempengaruhi morfologi butir ferrit yang terbentuk.

Selain itu, pada seluruh foto struktur mikro sampel 4 dan 5, terlihat ukuran butir tidaklah seragam jika dibandingkan dengan sampel 7. Dari foto terlihat adanya butir-butir berukuran sangat halus berbentuk relatif bulat (*equiaxed*) bercampur dengan butir-butir yang lebih kasar dan terelongasi. Ukuran butir yang tidak seragam seperti demikian disebabkan karena deformasi dilakukan di wilayah dua fasa [46]. Di wilayah dua fasa, ferrit lebih lunak dibandingkan dengan austenit, sehingga deformasi yang dilakukan di wilayah dua fasa tersebut akan menghasilkan butir ferrit yang besar dan terelongasi sebagai hasil transformasi austenit yang mengalami pengerasan kerja, bercampur dengan butir ferrit yang halus hasil rekristalisasi dinamis kontinu (*continuous dynamic recrystallization*) pada ferrit yang sudah bertransformasi sebelumnya [6, 46, 47]. Dari foto juga terlihat adanya kecenderungan bertambahnya jumlah butir-butir ferrit yang berbentuk *equiaxed* tersebut dengan bertambahnya regangan. Hasil ini sesuai dengan yang didapatkan oleh Eghbali [47].

Dari perhitungan ukuran butir ferrit, dapat dilihat bahwa secara umum, untuk satu sampel yang dicanai pada temperatur yang sama, ukuran butir ferrit semakin halus dengan semakin bertambahnya regangan. Hasil ini sudah sesuai dengan teori yang telah dipaparkan di bab 2. Hasil perhitungan ukuran butir ferrit juga memperlihatkan ukuran butir ferrit dalam rentang sekitar 2-3 μm . Ukuran butir ferrit yang demikian sudah termasuk dalam klasifikasi *ultra fine ferrite grain*. Menurut Eghbali [47], butir ferrit dengan ukuran dibawah 3 μm dapat dikategorikan sebagai *ultra fine ferrite grain*. Pembentukan *ultra fine ferrite grain* ini disebabkan oleh rekristalisasi dinamis kontinu (*continuous dynamic recrystallization*) dari ferrit ketika baja dicanai hangat di bawah temperatur A_{r3} [47] seperti pada sampel 4 dan 5; atau *strain-induced transformation* dari austenit menjadi ferrit ketika baja dicanai hangat diatas temperatur A_{r3} [48] seperti pada sampel 7. Pada sampel 7, pembentukan *ultra fine ferrite grain* juga dapat disebabkan secara konvensional dari transformasi austenit yang terdeformasi.

Pada sampel 7 yang dicanai pada temperatur 850°C, ditemukan bahwa ukuran butir ferritnya lebih besar dari sampel yang dicanai pada temperatur yang lebih rendah, jika dibandingkan dengan sampel 4 dan sampel 5, yang dicanai masing-masing pada temperatur 800°C dan 750°C. Hasil ini sudah cocok dengan teori yang telah dipaparkan di bab 2. Akan tetapi, pada sampel 4 dan 5, didapatkan ukuran butir ferrit yang hanya berbeda sedikit meskipun sampel 5 mengalami regangan yang lebih besar dibandingkan dengan sampel 4. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada sampel 5 yang dideformasi pada temperatur yang lebih rendah, fraksi volume ferrit yang terbentuk lebih banyak, sehingga meskipun deformasi masih terkonsentrasi pada ferrit, namun konsentrasi regangannya tidak setinggi pada sampel 4. Hal ini akan mengurangi jumlah ferrit yang mengalami rekristalisasi dinamis kontinu. Sebagai akibatnya, pada sampel 5 diperlukan regangan yang lebih besar untuk mendapatkan ukuran butir yang hampir sama dengan sampel 4, atau ukuran butir ferrit sampel 5 sedikit lebih besar dari sampel 4.

Gambar 4.5 berikut ini menunjukkan grafik d_α vs ϵ yang diperoleh dalam penelitian ini. Sebagai pembandingan, dimasukkan juga ukuran butir ferrit yang didapatkan dari beberapa penelitian terdahulu [5, 47, 49] dengan komposisi kimia baja dan temperatur canai yang mirip dengan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4.5 Perbandingan d_α Hasil Beberapa Penelitian vs ϵ

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat adanya perbedaan ukuran butir ferrit yang cukup besar antara hasil penelitian yang satu dengan yang lain, meskipun untuk baja dengan komposisi kimia yang mirip dan temperatur *finishing* yang sama. Hasil penelitian Bengochea, Lopez dan Gutierrez [5] memperlihatkan ukuran butir ferrit yang lebih besar dibandingkan dengan yang diperoleh dari penelitian ini sekalipun dengan laju pendinginan yang lebih tinggi, yakni 5°C/s. Hal ini dapat disebabkan oleh ukuran butir austenit semula yang lebih besar karena temperatur *heating* yang lebih tinggi, yakni 1200°C. Meskipun dalam penelitian mereka ukuran butir austenit dapat dihaluskan melalui rekristalisasi setelah deformasi diatas T_{nr} , tetapi ukuran butir austenit akhir yang dicapai masih lebih kasar dibandingkan dengan penelitian ini, yakni sekitar 40 μm . Sementara dari penelitian Eghbali [47, 49] baru didapatkan ukuran butir ferrit yang mendekati hasil penelitian ini pada regangan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan yang digunakan dalam penelitian ini, yakni pada $\varepsilon = 1-2$. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan laju regangan yang jauh lebih rendah, yakni 0,01/s [47] dan 0,1/s [49]. Secara umum, perbedaan ukuran butir ferrit antara berbagai penelitian dapat disebabkan oleh kondisi deformasi yang berbeda-beda satu dengan yang lain.

4.2.2 Penentuan dan Validasi Model Ukuran Butir Ferrit

Dalam penelitian ini, ukuran butir ferrit akan diprediksi dari lima variabel, yakni ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, temperatur canai panas, dan laju pendinginan. Pengaruh dari kelima variabel tersebut terhadap ukuran butir ferrit telah dikuantifikasi dalam beberapa penelitian terdahulu [5, 28, 43, 46], sehingga kelima variabel tersebut dapat digunakan untuk membuat persamaan ukuran butir ferrit. Dalam penelitian ini, persamaan ukuran butir ferrit akan dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$d_{\alpha} = a \times d_{\gamma}^A \times b \times \varepsilon^B \times c \times \dot{\varepsilon}^C \times d \times T^D \times e \times Cr^E \quad (4.5)$$

dengan d_{α} menyatakan ukuran butir ferrit (dalam μm), d_{γ} menyatakan ukuran butir austenit (dalam μm), ε menyatakan regangan, $\dot{\varepsilon}$ menyatakan laju regangan (dalam

1/s), T menyatakan temperatur canai panas (dalam K), Cr menyatakan laju pendinginan (dalam K/s), a , b , c , d , dan e menyatakan koefisien dari masing-masing variabel, dan A , B , C , D , dan E menyatakan pangkat dari masing-masing variabel.

Langkah selanjutnya ialah menentukan besar kesepuluh koefisien dan pangkat tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan pertama-tama mengambil logaritma natural dari persamaan diatas, sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\ln d_{\alpha} = \ln a + A \times \ln d_{\gamma} + \ln b + B \times \ln \varepsilon + \ln c + C \times \ln \dot{\varepsilon} + \ln d + D \times \ln T + \ln e + E \times \ln Cr \quad (4.6)$$

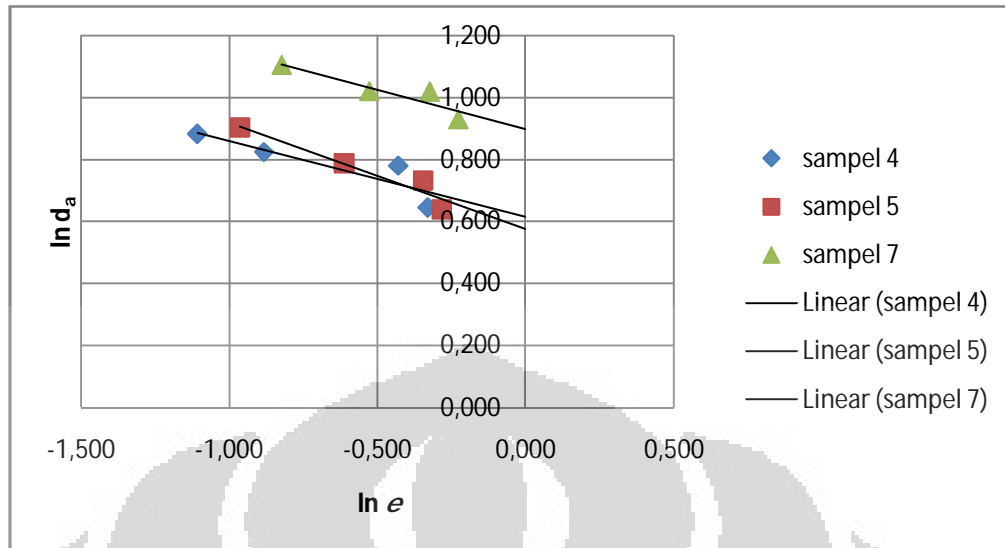
Selanjutnya penentuan kesepuluh koefisien dan pangkat tersebut akan dijelaskan sebagai berikut.

4.2.2.1 Penentuan Koefisien dan Pangkat d_{γ}

Dalam penelitian ini, tidak dilakukan variasi temperatur austenisasi. Dengan demikian, koefisien dan pangkat d_{γ} akan diambil dari penelitian terdahulu. Disini akan diambil pangkat yang telah didapatkan oleh Kvackaj dan Mamuzic [28], yakni $A = 0,4364 \approx 0,44$. Sementara itu, ditetapkan bahwa $a = 1$, dengan alasan bahwa jika $a \neq 1$, maka hasil penjumlahan $\ln a + \ln b + \ln c + \ln d + \ln e$ dapat disesuaikan dengan penambahan $\ln X$ di akhir, supaya didapatkan kecocokan antara ukuran butir ferrit menurut percobaan dengan ukuran butir ferrit menurut Persamaan.

4.2.2.2 Penentuan Koefisien dan Pangkat ε

Penentuan koefisien dan pangkat dari ε dilakukan dengan memplot grafik $\ln d_{\alpha}$ vs $\ln \varepsilon$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.6 Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$

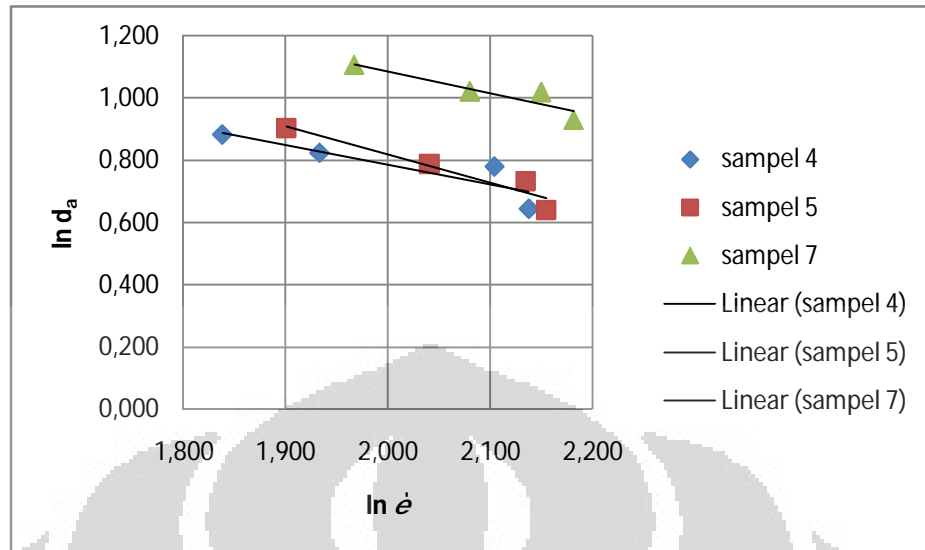
Dari regresi linear untuk grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$ ketiga sampel, didapatkan tiga kemungkinan untuk nilai b dan B , seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.6 berikut ini:

Tabel 4.6 Kemungkinan nilai $\ln b$ dan B

Kemungkinan	$\ln b$	B
1	0,898	-0,252
2	0,576	-0,333
3	0,614	-0,244

4.2.2.3 Penentuan Koefisien dan Pangkat ϵ

Penentuan koefisien dan pangkat dari ϵ dilakukan dengan memplot grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.7 berikut ini:



Gambar 4.7 Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$

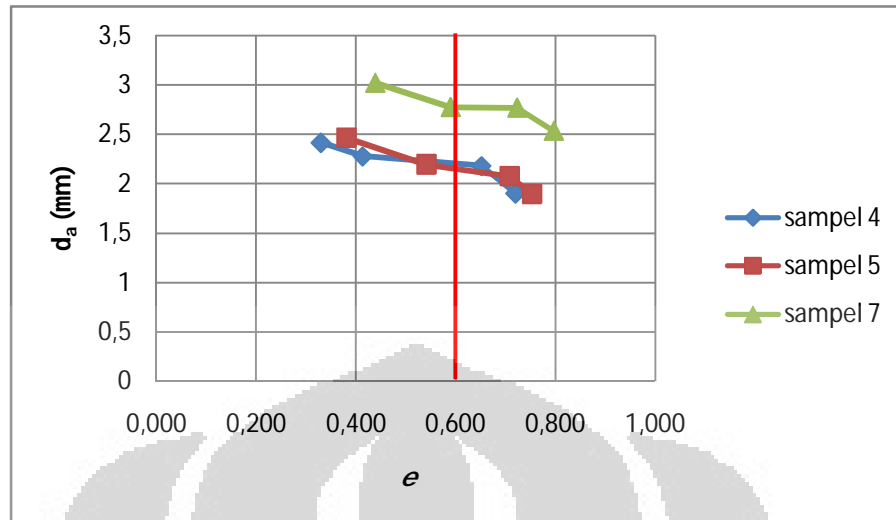
Dari regresi linear untuk grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln \epsilon$ ketiga sampel, didapatkan tiga kemungkinan untuk nilai c dan C , seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7 Kemungkinan nilai $\ln c$ dan C

Kemungkinan	$\ln c$	C
1	2,479	-0,697
2	2,637	-0,91
3	2,046	-0,63

4.2.2.4 Penentuan Koefisien dan Pangkat T

Penentuan koefisien dan pangkat dari T sedianyadilakukan dengan memplot grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln T$. Akan tetapi, karena tidak ada titik dalam sampel yang memiliki regangan yang sama persis, penentuan nilai $\ln d_\alpha$ pada satu nilai ϵ yang sama dilakukan dari grafik d_α vs ϵ seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.8 berikut ini:



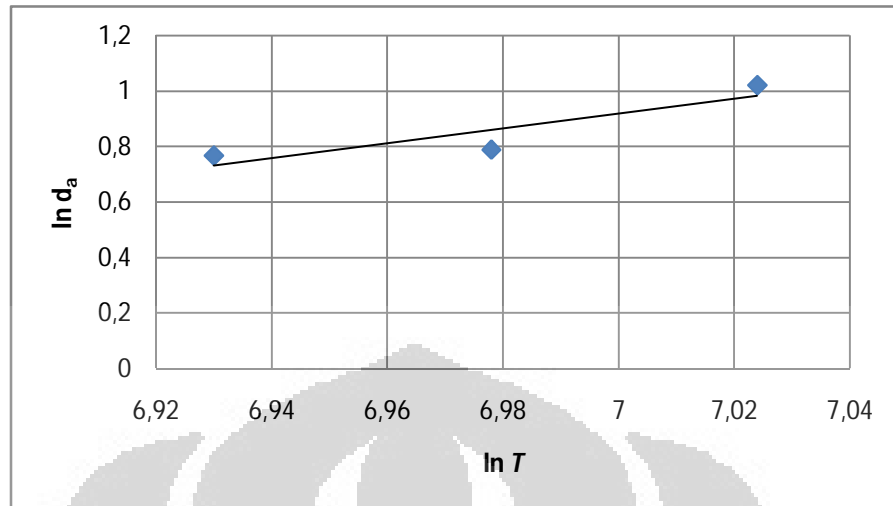
Gambar 4.8 Grafik d_α vs ϵ

Selanjutnya, dipilih satu nilai ϵ yang terletak ditengah-tengah rentangan ϵ dari ketiga sampel. Disini, dipilih ϵ sebesar 0,6. Untuk nilai ϵ tersebut, didapatkan d_α dan $\ln d_\alpha$ seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.8 berikut:

Tabel 4.8 Nilai d_α dan $\ln d_\alpha$ pada $\epsilon = 0,6$ untuk Ketiga Sampel

Sampel	d_α	$\ln d_\alpha$
4	2,201	0,78891
5	2,155	0,76779
7	2,775	1,02065

Selanjutnya, $\ln d_\alpha$ dapat diplot terhadap $\ln T$, seperti yang diperlihatkan dalam gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9 Grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln T$

Dari regresi linear untuk grafik $\ln d_\alpha$ vs $\ln T$ tersebut, didapatkan $\ln d = -17,79$ dan $D = 2,673$.

4.2.2.5 Penentuan Koefisien dan Pangkat Cr

Dalam penelitian ini juga tidak dilakukan variasi laju pendinginan. Dengan demikian, koefisien dan pangkat dari Cr akan diambil dari penelitian terdahulu. Disini akan diambil hasil penelitian Napitupulu [43], yang mendapatkan $\ln e = 1,732$ dan $E = -0,27$.

4.2.2.6 Penetapan Koefisien dan Pangkat dari Model Ukuran Butir Ferrit

Dari uraian diatas, didapatkan 9 kombinasi yang mungkin untuk koefisien dan 9 kombinasi yang mungkin untuk pangkat dari model ukuran butir ferrit. Kombinasi-kombinasi tersebut diperlihatkan dalam tabel 4.9 dan 4.10 dibawah ini:

Tabel 4.9 9 Kombinasi Koefisien yang Mungkin

ln a	ln b	ln c	ln d	ln e
0	0,898	2,479	-17,79	1,732
		2,637		
		2,046		
	0,576	2,479		
		2,637		
		2,046		
	0,614	2,479		
		2,637		
		2,046		

Tabel 4.10 9 Kombinasi Pangkat yang Mungkin

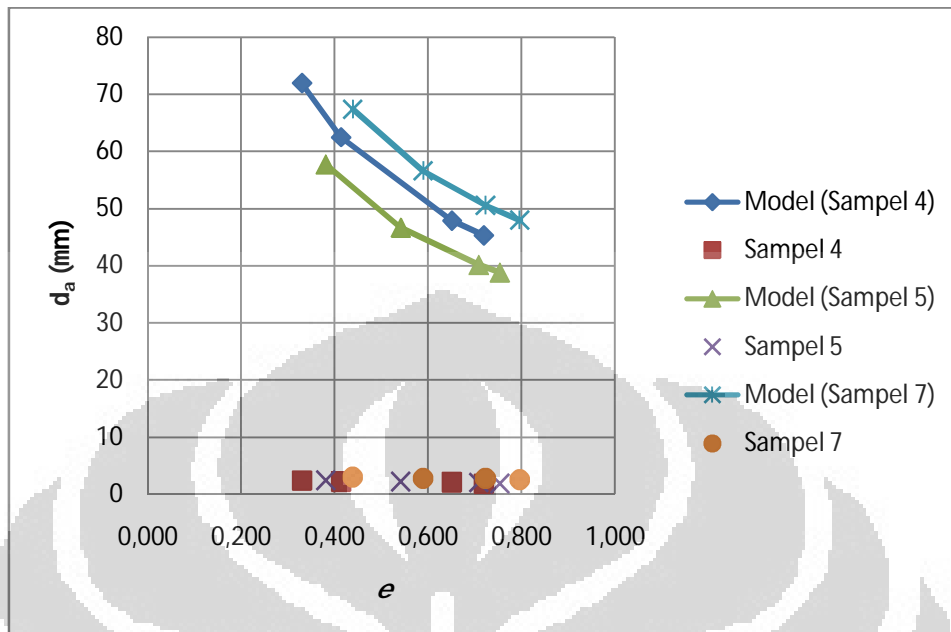
A	B	C	D	E
0,44	-0,252	-0,697	2,673	-0,27
		-0,91		
		-0,63		
	-0,333	-0,697		
		-0,91		
		-0,63		
	-0,244	-0,697		
		-0,91		
		-0,63		

Secara keseluruhan, ada 81 kombinasi koefisien dan pangkat yang mungkin untuk model ukuran butir ferrit. Dengan mencoba setiap kombinasi ini satu per satu, didapatkan bahwa kombinasi yang memberikan hasil yang paling mendekati percobaan ialah $\ln a = 0$, $A = 0,44$, $\ln b = 0,576$, $B = -0,244$, $\ln c = 2,046$, $C = -0,91$, $\ln d = -17,79$, $D = 2,673$, $\ln e = 1,732$, dan $E = -0,27$. Sehingga Persamaan 4.5 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\ln d_{\alpha} = 0 + 0,44 \ln d_{\gamma} + 0,576 - 0,244 \ln \varepsilon + 2,046 - 0,91 \ln \dot{\varepsilon} - 17,79 + 2,673 \ln T + 1,732 - 0,27 \ln Cr$$

$$d_{\alpha} = 1,46 \times 10^{-6} d_{\gamma}^{0,44} \varepsilon^{-0,244} \dot{\varepsilon}^{-0,91} T^{2,673} Cr^{-0,27} \quad (4.7)$$

Jika d_{α} yang didapatkan dari Persamaan 4.7 dibandingkan dengan d_{α} yang diperoleh dari penelitian, nampak adanya perbedaan yang sangat jauh, seperti yang diperlihatkan dari Gambar 4.10 berikut ini:



Gambar 4.10 Perbandingan d_{α} Model dan d_{α} Penelitian vs ε

Untuk itu, Persamaan 4.7 dalam bentuk logaritmanya perlu dimodifikasi dengan cara menambahkan faktor $\ln X$ sebesar $-3,093$ supaya diperoleh model ukuran butir ferrit yang mendekati penelitian. Dengan demikian, didapatkan persamaan akhir ukuran butir ferrit sebagai berikut:

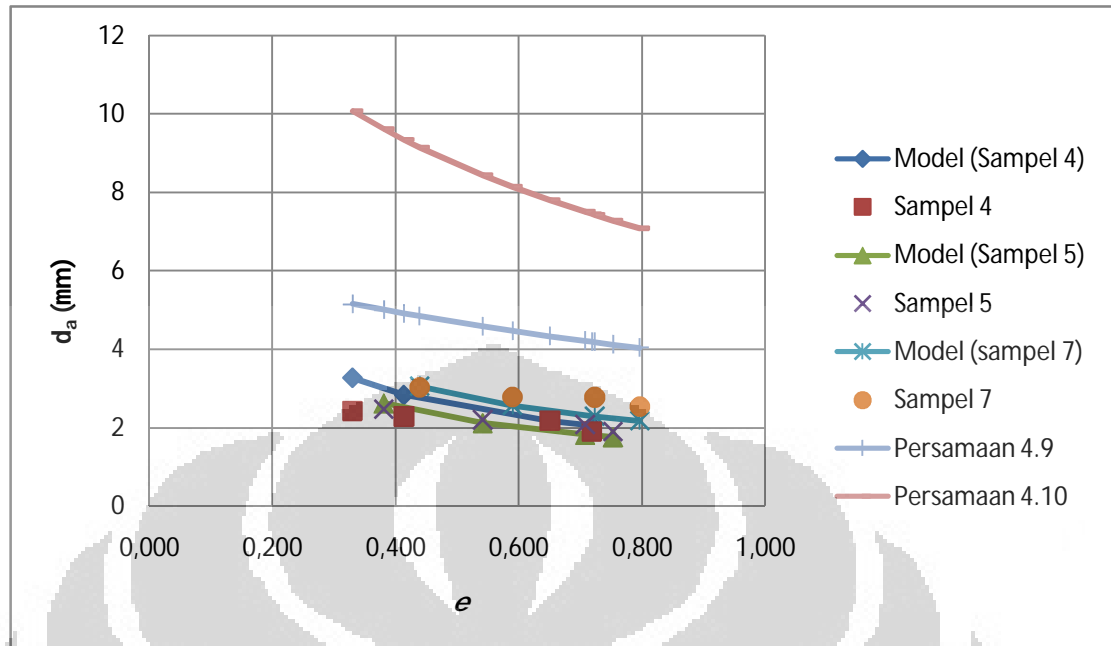
$$d_{\alpha} = 6,62 \times 10^{-8} d_{\gamma}^{0,44} \varepsilon^{-0,244} \dot{\varepsilon}^{-0,91} T^{2,673} Cr^{-0,27} \quad (4.8)$$

dengan d_{α} menyatakan ukuran butir ferrit yang didapat (dalam μm), d_{γ} menyatakan ukuran butir austenit sebelum dicanai (dalam μm), ε menyatakan regangan, $\dot{\varepsilon}$ menyatakan laju regangan (dalam 1/s), T menyatakan temperatur canai panas (dalam K), dan Cr menyatakan laju pendinginan (dalam K/s). Perbandingan antara d_{α} dari Persamaan 4.8 dengan d_{α} dari penelitian dapat dilihat dalam gambar 4.11 berikut ini. Selain itu sebagai pembandingan, dimasukkan juga dua persamaan yang didapatkan dari penelitian sebelumnya untuk baja Nb-HSLA. Persamaan pertama [5] ditunjukkan berikut ini:

$$d_{\alpha} = (1 - 0,5\varepsilon^{0,47})(4,5 + 3Cr^{0,5} + 13,4(1 - \exp(-0,015 d_{\gamma}))) \quad (4.9)$$

dan persamaan kedua [36] ditunjukkan berikut ini:

$$d_{\alpha} = (1 - 0,8\varepsilon^{0,15})(29 - 5Cr^{0,5} + 20(1 - \exp(-0,15 d_{\gamma}))) \quad (4.10)$$



Gambar 4.11 Perbandingan d_α Model Modifikasi, d_α Model Lain dan d_α Penelitian vs ε

Dari Gambar 4.11 tersebut dapat dilihat bahwa d_α yang didapatkan dari Persamaan 4.8 sudah mendekati hasil penelitian; sedangkan Persamaan 4.9 dan 4.10 memberikan hasil yang jauh lebih besar dari perhitungan. Selain itu, Persamaan 4.10 memberikan penurunan d_α dengan peningkatan ε yang lebih curam dibandingkan dengan data penelitian dan Persamaan 4.9 memberikan penurunan d_α dengan peningkatan ε yang mendekati Persamaan 4.8 dan data hasil penelitian. Kedua persamaan diperoleh dari penelitian dengan laju regangan yang sama pada tahap *finishing*, sehingga tidak ada variabel laju regangan dalam persamaan.

Persamaan 4.9 dapat memberikan hasil yang lebih besar dari data penelitian karena dalam penelitian tersebut digunakan laju regangan yang lebih rendah, yakni 1/s; walaupun digunakan temperatur *finishing* yang dekat dengan salah satu temperatur yang digunakan dalam penelitian ini, yakni 800°C. Persamaan 4.10 memberikan prediksi ukuran butir ferrit yang jauh lebih besar dari Persamaan 4.9 dan data hasil penelitian; hal ini dapat dikarenakan penelitian tersebut menggunakan temperatur *finishing* yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang digunakan di penelitian ini (divariasikan dari 775 °C hingga 1050 °C). Selain itu,

kedua persamaan tersebut juga didapatkan dari penelitian dengan deformasi berkali-kali, dan tenggat waktu *delay* yang mereka gunakan juga dapat mempengaruhi ukuran butir ferrit akhir yang mereka dapatkan. Terakhir, selain karena kondisi deformasi, perbedaan antara kedua persamaan dengan data yang diperoleh dari hasil penelitian ini juga dapat disebabkan oleh kondisi *finishing*. *Finishing* dibawah temperatur Ar_3 akan memberikan ukuran butir ferrit yang lebih halus dibandingkan dengan *finishing* diatas temperatur Ar_3 .

4.2.2.7 Validasi Model Ukuran Butir Ferrit

Ukuran butir ferrit yang diprediksi oleh Persamaan 4.8 ini masih perlu dibandingkan dengan ukuran butir ferrit yang didapatkan dari sampel yang dicanai panas dalam kondisi yang berbeda. Tabel 4.11 berikut ini menunjukkan kondisi canai panas dari sampel tersebut:

Tabel 4.11 Data Perlakuan Sampel No.2

Sampel No.	Kecepatan Rol (mm/s)	Temperatur <i>Heating</i> (°C)	Temperatur Canai (°C)
2	119	950	800

Kecepatan rol yang digunakan (119 mm/s) didapatkan pada frekuensi arus AC sebesar 35 Hz.

Sama seperti ketiga sampel yang lain, pada sampel no.2 ini juga akan dilakukan perhitungan ukuran butir ferrit pada empat lokasi yang berbeda. Tabel 4.12-4.14 berikut ini menunjukkan ketebalan sampel no.2 sebelum dan sesudah canai panas; reduksi, regangan dan laju regangan yang dialami, serta ukuran butir ferrit pada setiap titik dalam sampel no.2 tersebut.

Tabel 4.12 Ketebalan Sampel No.2 Sebelum dan Sesudah Canai Panas

Sampel No.	Titik ke-	Tebal Awal (mm)	Tebal Akhir (mm)	Perubahan Tebal (mm)
2	1	4,52	3,16	1,36
	2	5,18		2,02
	3	6,56		3,40
	4	6,72		3,56

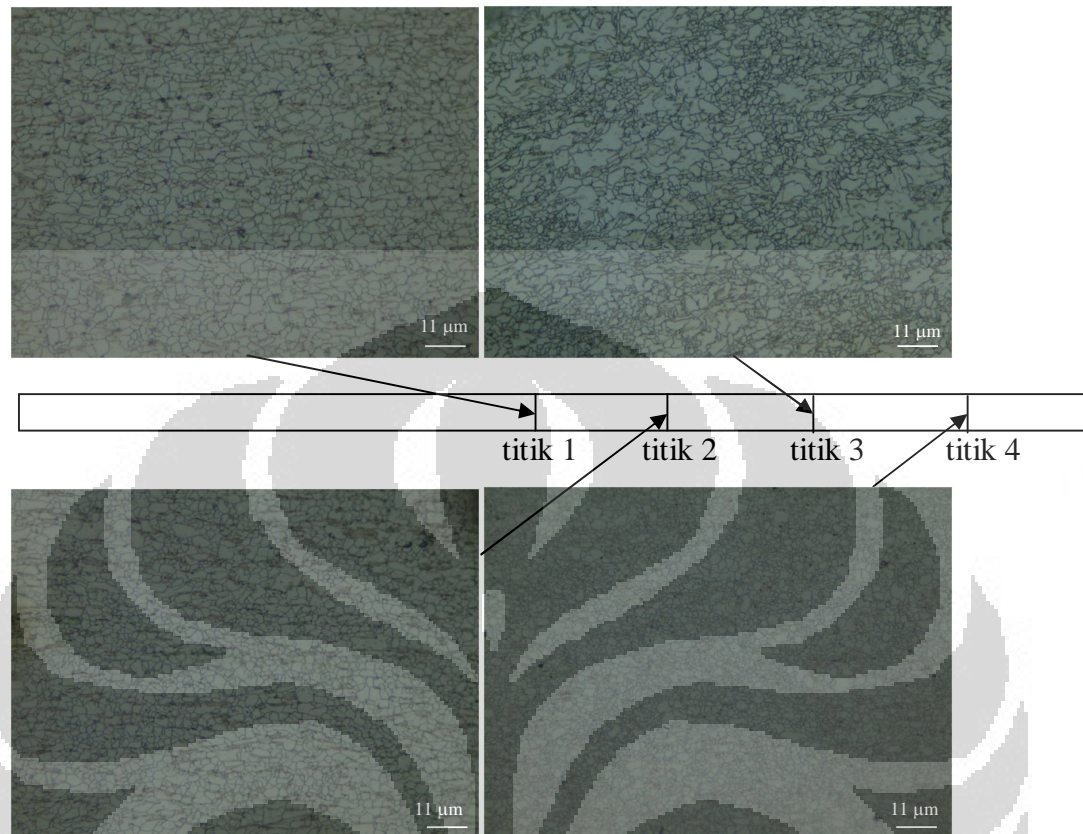
Tabel 4.13 Reduksi, Regangan, dan Laju Regangan Setiap Titik Dalam Sampel No.2

Sampel No.	Titik ke-	Reduksi	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (1/s)
2	1	0,3	0,412	5,837
	2	0,389	0,57	6,623
	3	0,518	0,843	7,548
	4	0,529	0,87	7,612

Tabel 4.14 Regangan, Laju Regangan, dan Ukuran Butir Ferrit Pada Sampel No.2

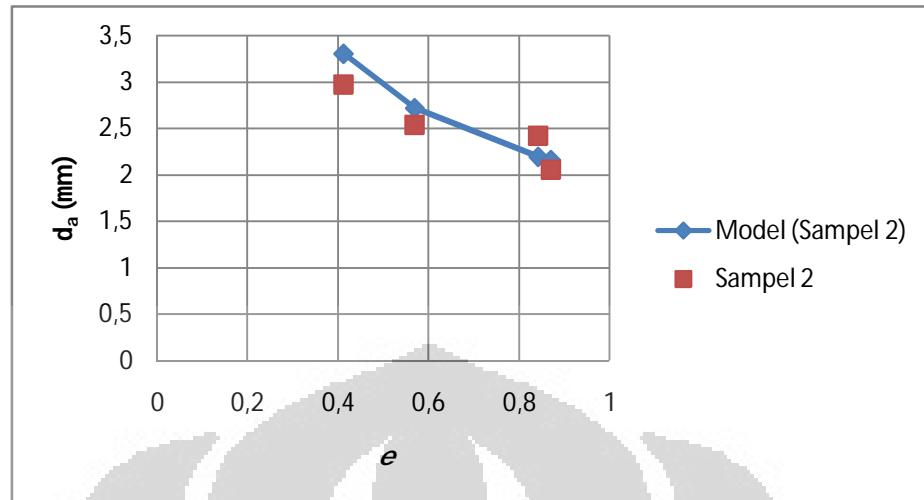
Sampel No.	Titik ke-	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	$d_{\alpha}(\mu\text{m})$
2	1	0,412	5,837	$2,974 \pm 0,065$
	2	0,57	6,623	$2,538 \pm 0,051$
	3	0,843	7,548	$2,423 \pm 0,159$
	4	0,87	7,612	$2,057 \pm 0,032$

Gambar 4.12 berikut ini menunjukkan foto struktur mikro dari sampel 2, yang diambil pada empat titik yang berbeda. Pada gambar dibawah juga diperlihatkan lokasi pengambilan tiap foto struktur mikro relatif terhadap panjang sampel.



Gambar 4.12 Foto Struktur Mikro Sampel 2 Untuk Keempat Titik Yang Berbeda

Dari hasil penelitian Priadi, Napitupulu, dan Siradj [20] ditemukan bahwa ukuran butir austenit yang didapatkan untuk austenisasi selama 10 menit pada temperatur 950°C tidak banyak berbeda dengan ukuran butir austenit yang didapatkan untuk austenisasi pada temperatur 900°C . Sementara itu, dalam penelitian ini digunakan waktu austenisasi yang lebih singkat, yakni selama 3 menit. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa ukuran butir austenit semula untuk sampel no.2 juga sebesar $5,37\ \mu\text{m}$. Dengan memasukkan data-data ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, dan temperatur canai, didapatkan ukuran butir ferrit menurut Persamaan 4.8. Ukuran butir ferrit ini lalu dibandingkan dengan ukuran butir ferrit yang diperoleh dari penelitian, dan diperlihatkan pada Gambar 4.13 berikut ini.



Gambar 4.13 Perbandingan d_α Model Modifikasi dan d_α Sampel No.2 vs ε

Dari Gambar 4.13 tersebut dapat dilihat bahwa Persamaan 4.8 mampu memberikan ukuran butir ferrit dengan hasil yang mendekati ukuran butir ferrit hasil penelitian pada sampel no.2.

4.2.3 Pembahasan Model Ukuran Butir Ferrit

Secara kualitatif, Persamaan 4.8 menyatakan bahwa ukuran butir ferrit akhir yang diperoleh akan semakin halus dengan semakin halusnya ukuran butir austenit semula, dengan semakin besarnya regangan dan laju regangan, dengan semakin rendahnya temperatur canai, dan dengan semakin besarnya laju pendinginan. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dijelaskan pada bab 2. Untuk mendapatkan ukuran butir ferrit yang paling mendekati hasil penelitian, maka konstanta dalam Persamaan 4.7 harus dikalikan dengan $\exp(-3,093) = 0,0454$. Koreksi ini dapat muncul karena sampel 4 dan 5 dideformasi di wilayah dua fasa, dimana ukuran butir ferrit akhir tidak hanya ditentukan oleh ukuran butir austenit semula, tetapi juga dapat ditentukan oleh fraksi ferrit semula dan ukuran butir ferrit semula. Selain itu, koreksi ini dapat disebabkan oleh penggunaan laju pendinginan rata-rata dari temperatur canai hingga temperatur ruang. Hal ini disebabkan oleh laju pendinginan yang semakin lambat dengan semakin kecilnya perbedaan antara temperatur sampel dengan udara. Koreksi yang lebih kecil dapat digunakan, jika yang diukur ialah laju pendinginan ke temperatur 550°C , seperti

yang digunakan oleh Kern dkk [8]. Temperatur 550°C tersebut dipilih karena dibawah temperatur tersebut, pertumbuhan butir ferrit menjadi sangat lambat dan dapat diabaikan.

Tabel 4.15 berikut ini memperlihatkan persentase perbedaan ukuran butir ferrit dari Persamaan 4.8 relatif terhadap ukuran butir ferrit yang diperoleh dari penelitian.

Tabel 4.15 Persentase Kesalahan Relatif Ukuran Butir Ferrit

Sampel No.	Titik ke-	d_{α} exp (μm)	d_{α} eqn (μm)	%error
2	1	2,974	3,302	11,032
	2	2,538	2,720	7,166
	3	2,423	2,195	9,408
	4	2,057	2,161	5,051
4	1	2,415	3,263	35,106
	2	2,278	2,832	24,337
	3	2,18	2,171	0,424
	4	1,905	2,055	7,879
5	1	2,465	2,619	6,259
	2	2,196	2,117	3,602
	3	2,079	1,820	12,447
	4	1,895	1,761	7,084
7	1	3,021	3,057	1,182
	2	2,775	2,567	7,513
	3	2,768	2,292	17,204
	4	2,534	2,175	14,170

Dari Tabel 4.15 terlihat bahwa Persamaan 4.8 hanya memberikan hasil dengan persentase kesalahan yang cukup rendah (dibawah 10%) pada titik-titik tertentu saja. Hal ini terutama disebabkan oleh penurunan d_{α} terhadap ε dalam tiga bagian yang berbeda, sementara penurunan d_{α} terhadap ε menurut Persamaan 4.8 membentuk suatu kurva yang mulus. Di bagian pertama dengan ε berkisar dari 0,3 hingga 0,4, terjadi penurunan d_{α} yang cukup jelas dengan penambahan ε sebesar kira-kira 0,1. Di bagian kedua, hanya terlihat adanya sedikit penurunan d_{α} walaupun dengan penambahan ε sebesar kira-kira 0,2. Dan di bagian ketiga

untuk ε berkisar dari 0,7 hingga 0,8, kembali terlihat adanya penurunan d_α yang cukup jelas bahkan dengan penambahan ε kurang dari 0,1. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengaruh ε terhadap penghalusan d_α berubah-ubah dengan besarnya ε itu sendiri dan pengaruhnya bersifat tidak mulus melainkan tiba-tiba. Hasil ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pembentukan *ultra fine ferrite grain* dapat saja baru dimulai pada ε antara 0,3 hingga 0,4, yang menyebabkan penghalusan d_α secara signifikan dan tiba-tiba. Kemudian dengan bertambahnya ε hingga kira-kira 0,7, terjadi penghalusan d_α secara bertahap akibat semakin banyaknya *ultra fine ferrite grain* yang terbentuk. Terakhir, untuk ε diatas 0,7, ada kemungkinan regangan kritis untuk pembentukan *ultra fine ferrite grain* telah tercapai atau terlewati secara homogen di seluruh sampel, sehingga terjadi pembentukan *ultra fine ferrite grain* yang ekstensif, yang kembali menyebabkan penghalusan d_α secara signifikan dan tiba-tiba.

Penurunan d_α terhadap ε dalam tiga bagian tersebut juga mempengaruhi koefisien dan pangkat untuk kelima variabel tersebut dalam persamaan. Perbedaan temperatur canai yang digunakan (di rentang temperatur satu fasa atau dua fasa) juga dapat mempengaruhi ukuran butir ferrit yang didapatkan, yang juga dapat mempengaruhi koefisien dan pangkat untuk kelima variabel tersebut dalam persamaan. Akurasi dari persamaan juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor teknis, seperti perbedaan temperatur canai antara bagian depan dengan bagian belakang sampel dan perbedaan laju pendinginan untuk bagian-bagian yang berbeda dari sampel.

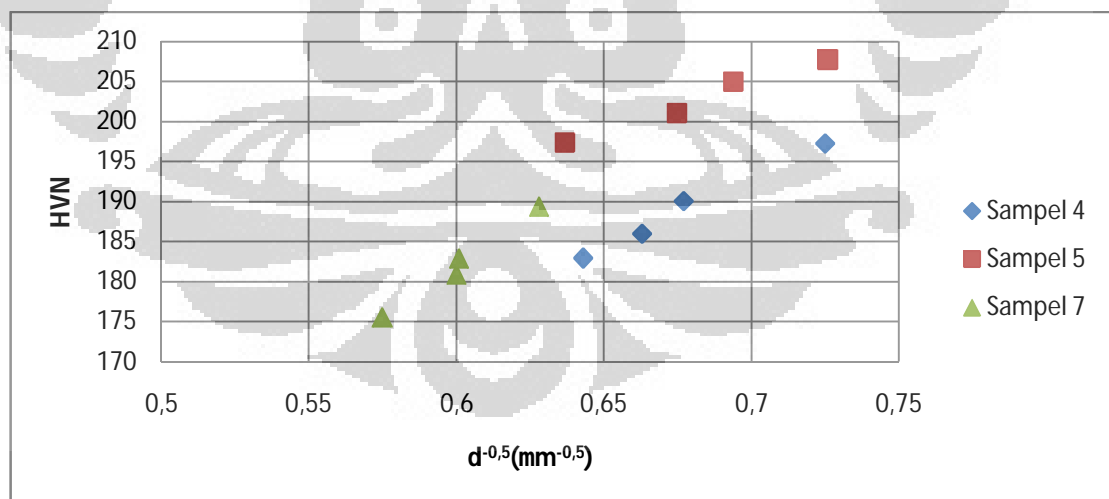
Terakhir, Persamaan 4.8 tersebut memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, persamaan ini belum tentu berlaku untuk baja dengan komposisi kimia yang berbeda. Kedua, persamaan ini didapatkan secara empiris untuk canai panas dibawah temperatur rekristalisasi, sehingga persamaan ini belum tentu berlaku jika canai panas dilakukan diatas temperatur rekristalisasi. Ketiga, persamaan ini belum tentu berlaku untuk canai panas dengan dua atau lebih *pass*. Keempat, persamaan ini didapatkan secara empiris dari ukuran butir ferrit yang pada sisi tebal dari sampel, sehingga persamaan ini belum tentu mampu memodelkan ukuran butir ferrit pada sisi lain dari sampel dengan akurat. Kelima, persamaan ini belum tentu berlaku jika canai panas dilakukan pada regangan dan/atau laju

regangan yang berbeda jauh dari yang digunakan dalam penelitian ini. Dan terakhir, persamaan ini belum tentu berlaku pada laju pendinginan yang lebih tinggi. Pada laju pendinginan yang lebih tinggi, mikrostruktur dapat terdiri dari campuran ferrit dan perlit, yang mana penentuan ukuran butirnya berada diluar jangkauan penelitian ini.

4.3 Pembahasan Data Kekerasan Vickers

4.3.1 Pembahasan Kekerasan Vickers yang Didapat

Tabel 4.5 menunjukkan kekerasan Vickers dari seluruh titik dalam sampel. Terlihat bahwa sampel yang dicanai memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang tidak dicanai. Peningkatan kekerasan yang terjadi juga cukup besar, dari 157,45 HVN ke 175,787 HVN. Jika kekerasan Vickers tersebut dihubungkan dengan ukuran butir ferrit seperti yang diperlihatkan dalam Tabel 4.4, terlihat adanya peningkatan kekerasan Vickers dengan semakin halusanya ukuran butir ferrit, seperti yang diprediksi oleh Persamaan Hall-Petch. Hasil ini diperlihatkan pada Gambar 4.14 berikut ini:



Gambar 4.14 Grafik HVN vs $d^{-0.5}$

Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa titik keempat pada sampel 7 memiliki kekerasan Vickers yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik pertama pada

sampel 4, walaupun ukuran butir ferrit pada sampel 7 lebih besar. Selain itu, kekerasan Vickers titik pertama dan keempat di sampel 5 lebih tinggi dibandingkan dengan titik pertama dan keempat di sampel 4, walaupun ukuran butir ferritnya tidak berbeda jauh. Meskipun kekerasan Vickers meningkat dengan bertambah halusya ukuran butir, tetapi hal tersebut hanya berlaku jika setiap sampel ditinjau secara individual. Tetapi jika ditinjau secara keseluruhan, nampak bahwa kekerasan tidak ditentukan oleh ukuran butirnya.

Dari Gambar 4.11 terlihat bahwa ukuran butir semakin halus dengan semakin bertambahnya regangan. Dari sini, dapat dikatakan bahwa peningkatan regangan menyebabkan peningkatan kekerasan Vickers. Peningkatan regangan juga akan diikuti oleh peningkatan laju regangan, sehingga dapat dikatakan bahwa peningkatan laju regangan juga menyebabkan peningkatan kekerasan Vickers. Selain itu, dari Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa sampel 5 yang dicanai pada temperatur yang lebih rendah dari sampel 4 memiliki kekerasan yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil ini, dapat dikatakan bahwa penurunan temperatur canai menyebabkan peningkatan kekerasan Vickers. Berdasarkan penjelasan tersebut, maka model kekerasan Vickers akan dibuat dalam variabel regangan, laju regangan, temperatur canai, serta ukuran butir ferrit akhir dengan pangkat -0,5; seperti yang terdapat dalam Persamaan Hall-Petch (Persamaan 2.18)

4.3.2 Penentuan dan Validasi Model Kekerasan Vickers

Dalam penelitian ini, persamaan untuk kekerasan Vickers akan dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$HVN = d_{\alpha}^{-0,5} \times f \times \varepsilon^F \times g \times \dot{\varepsilon}^G \times h \times T^H \quad (4.11)$$

dengan d_{α} menyatakan ukuran butir ferrit (dalam μm), ε menyatakan regangan, $\dot{\varepsilon}$ menyatakan laju regangan (dalam 1/s), dan T menyatakan temperatur canai panas (dalam K), f , g , dan h menyatakan koefisien dari masing-masing variabel, F , G , dan H menyatakan pangkat dari masing-masing variabel.

Langkah selanjutnya ialah menentukan besar keenam koefisien dan pangkat tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan pertama-tama mengambil logaritma

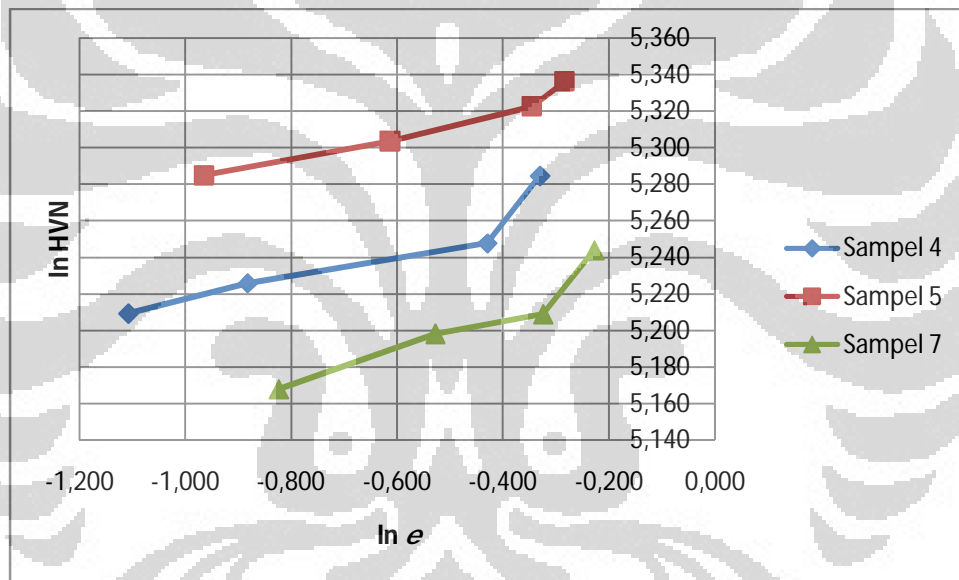
natural dari persamaan diatas, sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\ln HVN = -0,5 \times \ln d_{\alpha} + \ln f + F \times \ln \varepsilon + \ln g + G \times \ln \dot{\varepsilon} + \ln h + H \times \ln T \quad (4.12)$$

Selanjutnya penentuan keenam koefisien dan pangkat tersebut akan dijelaskan sebagai berikut.

4.3.2.1 Penentuan Koefisien dan Pangkat ε

Penentuan koefisien dan pangkat dari ε dilakukan dengan memplot grafik $\ln HVN$ vs $\ln \varepsilon$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.15 berikut ini:



Gambar 4.15 Grafik $\ln HVN$ vs $\ln \varepsilon$

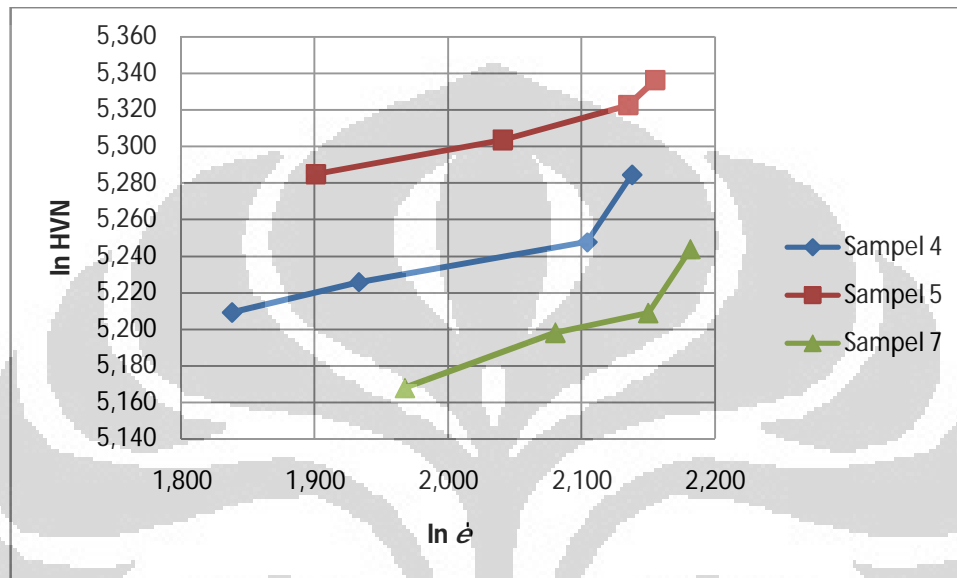
Dari regresi linear untuk grafik $\ln HVN$ vs $\ln \varepsilon$ ketiga sampel, didapatkan tiga kemungkinan untuk nilai f dan F , seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.16 berikut ini:

Tabel 4.16 Kemungkinan nilai $\ln f$ dan F

Kemungkinan	$\ln f$	F
1	5,350	0,07
2	5,298	0,082
3	5,258	0,113

4.3.2.2 Penentuan Koefisien dan Pangkat ϵ

Penentuan koefisien dan pangkat dari ϵ dilakukan dengan memplot grafik \ln HVN vs $\ln \epsilon$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.16 berikut ini:



Gambar 4.16 Grafik \ln HVN vs $\ln \epsilon$

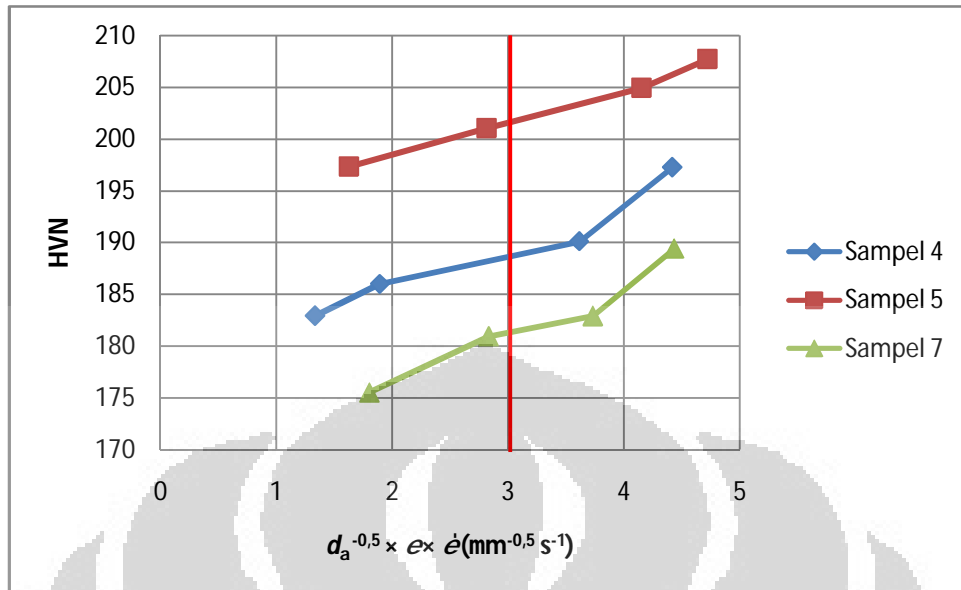
Dari regresi linear untuk grafik \ln HVN vs $\ln \epsilon$ ketiga sampel, didapatkan tiga kemungkinan untuk nilai g dan G seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.17 berikut ini:

Tabel 4.17 Kemungkinan nilai $\ln g$ dan G

Kemungkinan	$\ln g$	G
1	4,925	0,187
2	4,815	0,212
3	4,550	0,312

4.3.2.3 Penentuan Koefisien dan Pangkat T

Penentuan koefisien dan pangkat dari T pertama-tama dilakukan dengan memplot grafik HVN vs $d_\alpha^{-0,5} \times \epsilon \times \epsilon$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.17 berikut ini:



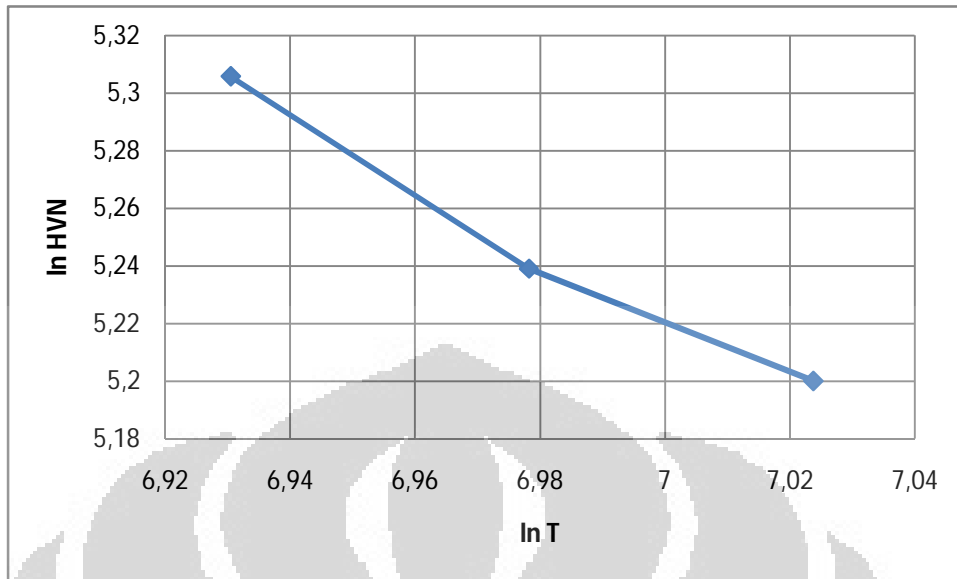
Gambar 4.17 Grafik HVN vs $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$

Selanjutnya, dipilih satu nilai $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$. Disini akan dipilih $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$ sebesar 3, sebab $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon} = 3$ terletak diantara titik 2 dan titik 3 dari seluruh sampel. Untuk nilai $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$ tersebut, didapatkan HVN dan \ln HVN seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.18 berikut:

Tabel 4.18 Nilai HVN dan \ln HVN pada $d_\alpha^{-0.5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon} = 3$ untuk Ketiga Sampel

Sampel	HVN	\ln HVN
4	188,5	5,239
5	201,5	5,306
7	181,3	5,200

Selanjutnya, \ln HVN dapat diplot terhadap $\ln T$, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.18 berikut:



Gambar 4.18 Grafik ln HVN vs ln T

Dari regresi linear untuk grafik ln HVN vs ln T tersebut, didapatkan ln $h = 13,16$ dan $H = -1,134$.

4.3.2.4 Penetapan Koefisien dan Pangkat dari Model Kekerasan Vickers

Dari uraian diatas, didapatkan 9 kombinasi yang mungkin untuk koefisien dan 9 kombinasi yang mungkin untuk pangkat dari model kekerasan Vickers. Kombinasi-kombinasi tersebut diperlihatkan dalam Tabel 4.18 dan 4.19 dibawah ini:

Tabel 4.19 9 Kombinasi Koefisien yang Mungkin

ln f	ln g	ln h
5,35	4,925	13,16
	4,815	
	4,55	
5,298	4,925	
	4,815	
	4,55	
5,258	4,925	
	4,815	
	4,55	

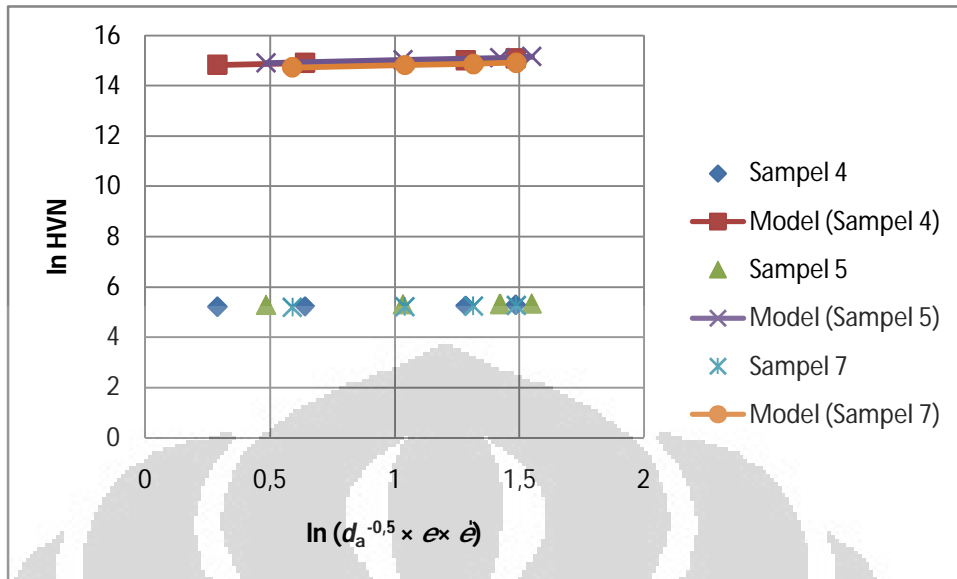
Tabel 4.20 9 Kombinasi Pangkat yang Mungkin

F	G	H
0,07	0,187	-1,134
	0,212	
	0,312	
0,082	0,187	
	0,212	
	0,312	
0,113	0,187	
	0,212	
	0,312	

Secara keseluruhan, ada 81 kombinasi koefisien dan pangkat yang mungkin untuk model kekerasan Vickers. Dengan mencoba setiap kombinasi ini satu per satu, didapatkan bahwa kombinasi yang memberikan hasil yang paling mendekati percobaan ialah $\ln f = 5,258$, $F = 0,113$, $\ln g = 4,55$, $G = 0,187$, $\ln h = 13,16$, dan $H = -1,134$. Sehingga Persamaan 4.11 dapat ditulis sebagai berikut:

$$HVN = 9,438 \times 10^9 d_a^{-0,5} \varepsilon^{0,113} \varepsilon^{0,187} T^{-1,134} \quad (4.13)$$

Jika $\ln HVN$ yang didapatkan dari persamaan ini dibandingkan dengan $\ln HVN$ yang diperoleh dari penelitian, nampak adanya perbedaan yang sangat jauh, seperti yang diperlihatkan dari Gambar 4.19 berikut ini:

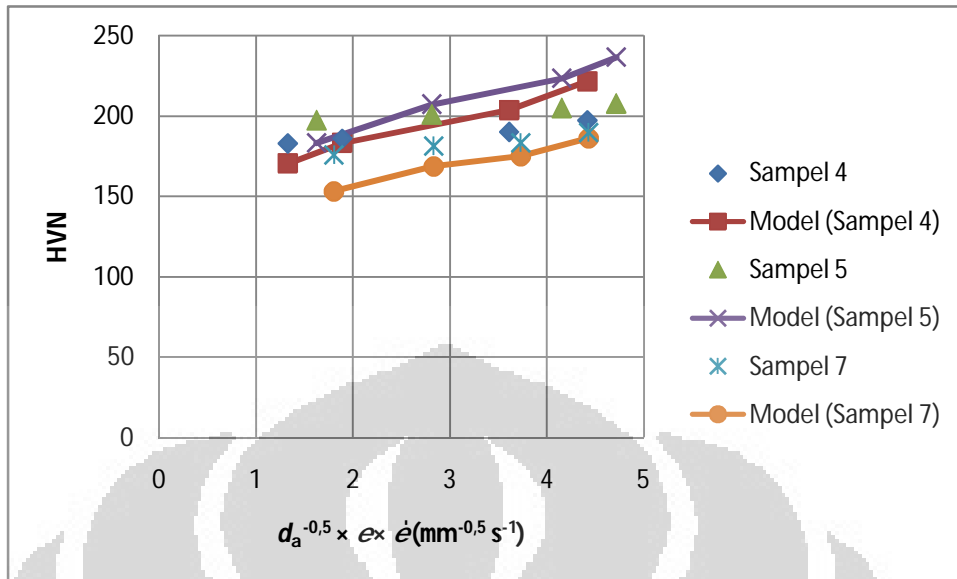


Gambar 4.19 Perbandingan ln HVN Model dan ln HVN Penelitian vs $\ln (d_{\alpha}^{-0,5} \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon})$

Untuk itu Persamaan 4.13 dalam bentuk logaritmanya perlu dimodifikasi dengan cara menambahkan faktor $\ln X$ sebesar $-9,694$ supaya diperoleh model kekerasan Vickers yang mendekati penelitian. Dengan demikian, didapatkan persamaan akhir kekerasan Vickers sebagai berikut:

$$\mathbf{HVN = 5,819 \times 10^5 d_{\alpha}^{-0,5} \varepsilon^{0,113} \dot{\varepsilon}^{0,187} T^{-1,134}} \quad (4.14)$$

Perbandingan antara HVN dari Persamaan 4.14 dengan HVN dari penelitian dapat dilihat dalam Gambar 4.20 berikut ini. Dari Gambar 4.20 tersebut dapat dilihat bahwa HVN yang didapatkan dari Persamaan 4.14 sudah mendekati hasil penelitian.



Gambar 4.20 Perbandingan HVN Model Modifikasi dan HVN Penelitian vs

$$d_a^{-0.5} \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$$

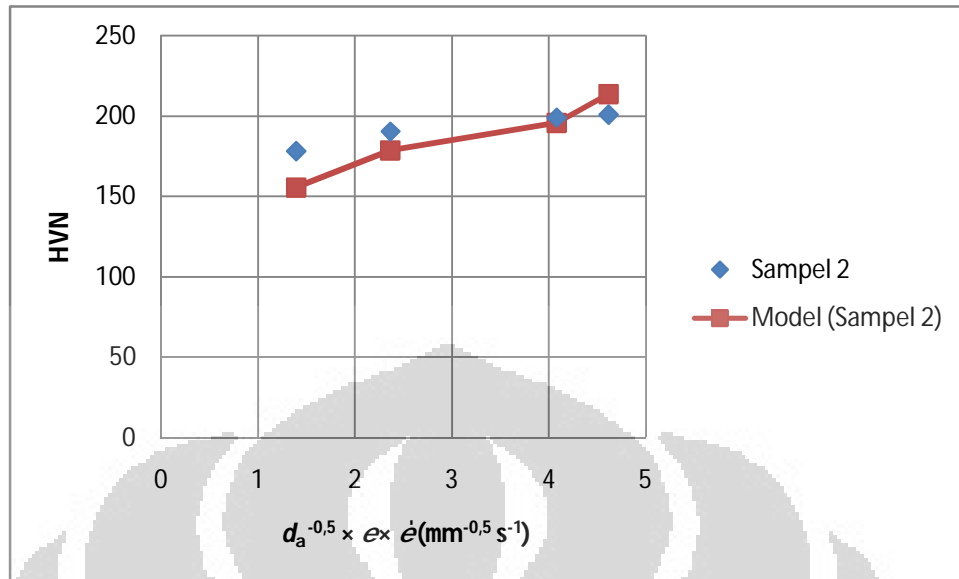
4.3.2.4 Validasi Model Kekerasan Vickers

Kekerasan Vickers yang diprediksi oleh Persamaan 4.14 ini akan dibandingkan dengan kekerasan Vickers dari sampel 2. Tabel 4.20 berikut ini menunjukkan kekerasan Vickers dari sampel 2 yang diperoleh dari hasil penelitian.

Tabel 4.21 Kekerasan Vickers Seluruh Titik Dalam Sampel No.2

Sampel No.	Titik ke-	HVN
2	1	178,023±2,899
	2	190,181± 6,770
	3	198,802± 3,905
	4	200,678± 3,214

Dengan memasukkan data-data ukuran butir ferrit, regangan, laju regangan, dan temperatur canai, didapatkan kekerasan Vickers menurut Persamaan 4.14. Kekerasan Vickers ini lalu dibandingkan dengan kekerasan Vickers yang diperoleh dari penelitian, dan diperlihatkan pada Gambar 4.21 berikut.



Gambar 4.21 Perbandingan HVN Model Modifikasi dan HVN Sampel No.2 vs $d_a^{-0.5} \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$

Dari Gambar 4.21 tersebut dapat dilihat bahwa Persamaan 4.14 mampu memberikan kekerasan Vickers yang mendekati kekerasan Vickers yang didapatkan untuk sampel no.2.

4.3.3 Pembahasan Model Kekerasan Vickers

Persamaan 4.14 menunjukkan secara kuantitatif pengaruh dari ukuran butir ferrit akhir dan beberapa variabel canai panas, seperti regangan, laju regangan, dan temperatur canai, terhadap kekerasan Vickers yang didapatkan. Dari Persamaan 4.14 ini terlihat bahwa kekerasan Vickers akan semakin tinggi jika ukuran butir ferrit akhirnya semakin halus, jika regangan dan laju regangan semakin besar, dan jika temperatur canai semakin rendah. Hasil ini sudah sesuai dengan teori.

Tabel 4.21 berikut ini memperlihatkan persentase perbedaan kekerasan Vickers dari Persamaan 4.14 relatif terhadap kekerasan Vickers yang diperoleh dari penelitian. Dari Tabel 4.21 dapat dilihat bahwa Persamaan 4.14 mampu memprediksi kekerasan Vickers dengan akurasi yang cukup baik.

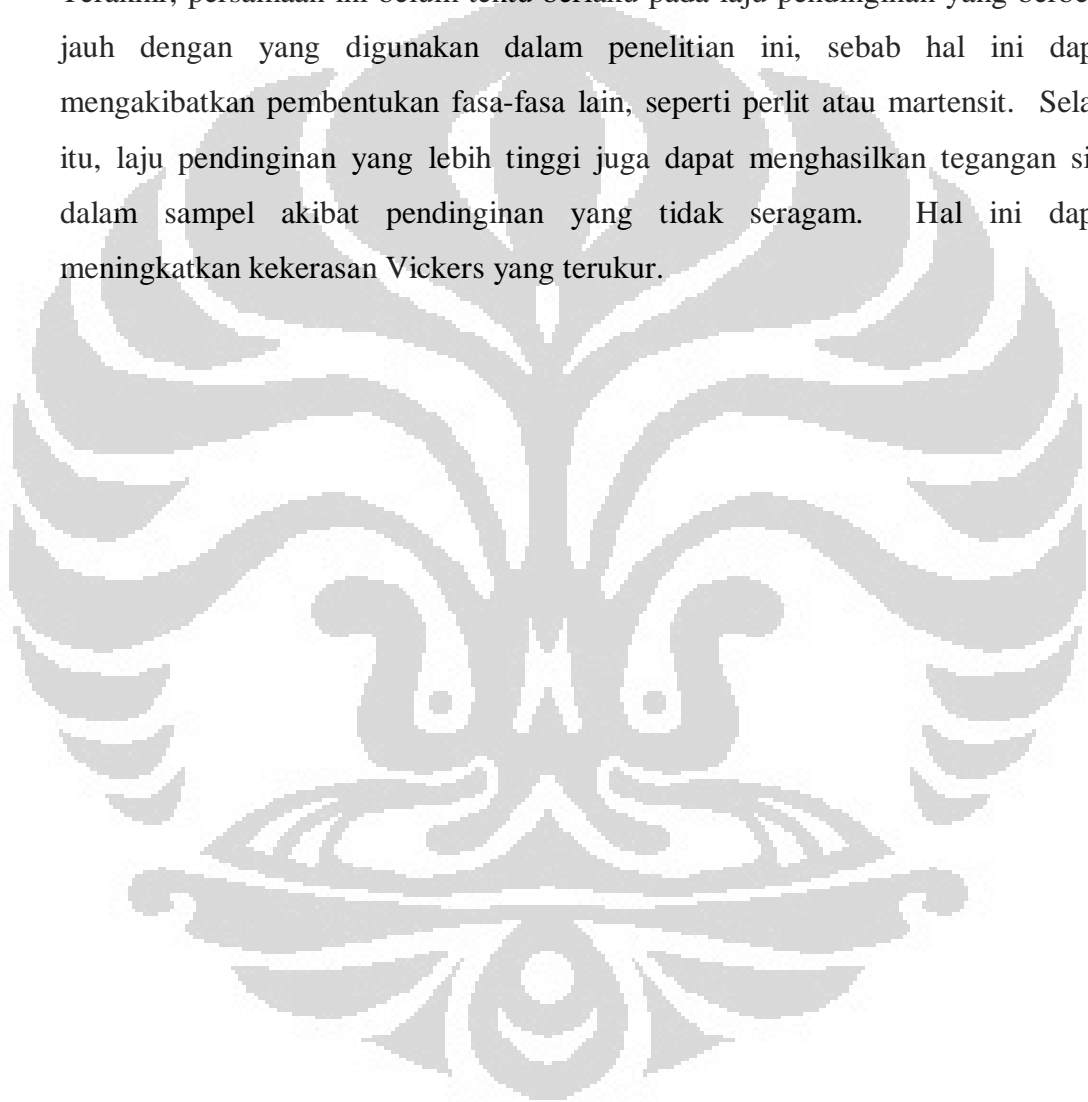
Tabel 4.22 Persentase Kesalahan Relatif Kekerasan Vickers

Sampel No.	Titik ke-	HVN exp	HVN eqn	% error
2	1	178,023	155,335	12,744
	2	190,181	178,580	6,100
	3	198,802	195,757	1,532
	4	200,678	213,581	6,430
4	1	182,925	170,390	6,853
	2	185,993	183,191	1,506
	3	190,107	203,499	7,044
	4	197,264	221,534	12,303
5	1	197,337	183,081	7,224
	2	201,054	207,169	3,042
	3	204,921	223,354	8,995
	4	207,711	236,466	13,844
7	1	175,514	153,058	12,795
	2	180,919	168,640	6,787
	3	182,890	175,057	4,283
	4	189,395	186,064	1,759

Dalam Persamaan 4.14 terdapat konstanta bernilai $5,819 \times 10^5$. Secara fisis, konstanta ini dapat menghubungkan pengaruh dari berbagai variabel-variabel canai panas dan ukuran butir ferrit akhir terhadap kekerasan Vickers. Pengaruh dari variabel ukuran butir ferrit akhir terhadap kekerasan telah dijelaskan dalam bab 2. Lalu ketiga variabel lainnya yakni regangan, laju regangan, dan temperatur canai berhubungan dengan pengerasan kerja, yang juga menyebabkan peningkatan kekerasan sampel. Semakin tinggi regangan dan laju regangan serta semakin rendah temperatur canai, maka pengerasan kerja yang terjadi akan semakin besar dan kekerasan sampel semakin tinggi. Disamping itu, konstanta ini juga dapat menghubungkan pengaruh dari berbagai mekanisme penguatan lainnya yang tidak terukur dalam penelitian ini; seperti larutan padat, presipitat, partikel fasa kedua yang terbentuk di batas butir, batas butir bersudut rendah (*low angle grain boundaries*), dan *lattice friction stress* [17]; terhadap kekerasan Vickers yang terukur.

Terakhir, Persamaan 4.14 tersebut memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, persamaan ini tidak berlaku untuk baja dengan komposisi kimia yang berbeda, karena hal tersebut akan mengakibatkan perbedaan penguatan akibat

larutan padat. Selain itu, perbedaan komposisi kimia tersebut juga akan menghasilkan presipitat dengan jenis serta distribusi yang berbeda. Kedua, persamaan ini belum tentu berlaku pada regangan, laju regangan, dan temperatur canai yang jauh berbeda dengan yang digunakan dalam penelitian ini. Ketiga, persamaan ini diturunkan untuk memprediksi kekerasan Vickers dari baja ferritik, sehingga persamaan ini tidak berlaku jika baja terdiri dari fasa-fasa yang lain. Terakhir, persamaan ini belum tentu berlaku pada laju pendinginan yang berbeda jauh dengan yang digunakan dalam penelitian ini, sebab hal ini dapat mengakibatkan pembentukan fasa-fasa lain, seperti perlit atau martensit. Selain itu, laju pendinginan yang lebih tinggi juga dapat menghasilkan tegangan sisa dalam sampel akibat pendinginan yang tidak seragam. Hal ini dapat meningkatkan kekerasan Vickers yang terukur.



BAB V KESIMPULAN

1. Hubungan antara ukuran butir ferrit akhir dengan ukuran butir austenit semula, regangan, laju regangan, temperatur canai, dan laju pendinginan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$d_{\alpha} = 6,62 \times 10^{-8} d_{\gamma}^{0,44} \epsilon^{-0,244} \dot{\epsilon}^{-0,91} T^{2,673} Cr^{-0,27}$$

2. Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa ukuran butir ferrit akhir akan semakin halus dengan bertambahnya regangan, laju regangan, dan laju pendinginan, dengan semakin halusya ukuran butir austenit semula, dan dengan semakin rendahnya temperatur canai.
3. Kekerasan Vickers tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran butir ferrit, tetapi juga oleh regangan, laju regangan, dan temperatur canai.
4. Hubungan antara kekerasan Vickers dengan ukuran butir ferrit akhir, regangan, laju regangan, dan temperatur canai, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$HVN = 5,819 \times 10^5 d_{\alpha}^{-0,5} \epsilon^{0,113} \dot{\epsilon}^{0,187} T^{-1,134}$$

5. Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa kekerasan Vickers akan semakin tinggi dengan semakin halusya ukuran butir ferrit akhir, dengan bertambahnya regangan serta laju regangan, dan dengan semakin rendahnya temperatur canai.
6. Kedua persamaan diatas hanya berlaku pada baja dengan komposisi kimia dan kondisi canai panas yang dekat dengan yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

- [1]: Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K. (1995). *Steels Microstructure and Properties*, 2nd edn. Edward Arnold, London.
- [2]: Callister, W.D. (2007). *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 7th edn. John Wiley & Sons, New York.
- [3]: Smallman, R.E., Ngan, A.H.W. (2007). *Physical Metallurgy and Advanced Materials*, 7th edn. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [4]: Fujita, N., Narushima, T., Iguchi, Y., Ouchi, C. Grain Refinement of As Cast Austenite by Dynamic Recrystallization in HSLA Steels, *ISIJ Int.*, 43:7 (2003): 1063-1072.
- [5]: Bengochea, R., Lopez, B., Gutierrez, I. Influence of the Prior Austenite Microstructure on the Transformation Products Obtained for C-Mn-Nb Steels after Continuous Cooling, *ISIJ Int.*, 39:6 (1999): 583-591.
- [6]: Liu, Y., Zhu, F., Li, Y., Wang, G. Effect of TMCP Parameters on Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloyed Steel, *ISIJ Int.*, 45:6 (2005): 851-857.
- [7]: Majta, J., Kuziak, R., Pietrzyk, M., Krzton, H. Use of The Computer Simulation to Predict Mechanical Properties of C-Mn Steels, After Thermomechanical Processing, *Journal of Materials Processing Technology*, 60 (1996): 581-588
- [8]: Kern, A., Degenkolbe, J., Musgen, B., Schriever, U. Computer Modelling for the Prediction of Microstructure Development and Mechanical Properties of HSLA Steel Plates, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992): 387-394.
- [9]: Newton, J. (1959). *An Introduction to Metallurgy*, 2nd edn. John Wiley and Sons, Inc., USA.
- [10]: *ASM Handbook Vol 4: Heat Treating*. (1991). ASM International, Materials Park, Ohio, USA.

- [11]: Brockenbrough, R.L., Merritt, F.S. (2011). Structural Steel Designers' Handbook, 5th edn. McGraw-Hill, USA.
- [12]: Zedeh, A.A., Dunne, D.P. Effect of Nb on Recrystallization After Hot Deformation in Austenitic Fe–Ni–C, *ISIJ Int.*, 43:8 (2003), 1213-1218.
- [13]: Dieter, G.E. (1976). Mechanical Metallurgy, 2nd edn. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- [14]: DeGarmo, P.E. (1979). Materials and Processes in Manufacturing, 5th edn. Macmillan Publishing Co., Inc., USA.
- [15]: Beynon, J.H., Sellars, C.M. Modelling Microstructure and Its Effects during Multipass Hot Rolling, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992), 359-367.
- [16]: Biglou, J., Lenard, J.G. A Study of Dynamic Recrystallization During Hot Rolling of Microalloyed Steels, *Annals of the CIRP*, 45:1 (1996), 227-230.
- [17]: Majta, J., Kuziak, R., Pietrzyk, M. Modelling of the Influence of Thermomechanical Processing of Nb-microalloyed Steel on the Resulting Mechanical Properties, *Journals of Materials Processing Technology*, 80-81 (1998), 524-530.
- [18]: http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=hot_rolling_of_steel_slabs.png, diakses tanggal 31 Oktober 2012
- [19]: Siwecki, T. Modelling of Microstructure Evolution During Recrystallization Controlled Rolling, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992), 368-376.
- [20]: Priadi, D., Napitupulu, R.A.M., Siradj, E.S. Austenite Grain Growth Calculation of 0,028% Nb Steel, *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.*, 47:2 (2011): 199-209.
- [21]: Yoshie, A., Fujioka, M., Watanabe, Y., Nishioka, K., Morikawa, H. Modelling of Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Steel Plates Produced by Thermo-Mechanical Control Process, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992): 395-404.

- [22]: Suikkanen, P.P., Lang, V.T.E, Somani, M.C., Porter, D.A., Karjalainen, L.P. Effect of Silicon and Aluminium on Austenite Static Recrystallization Kinetics in High-strength TRIP-aided Steels, *ISIJ Int.*, 52:3 (2012), 471-476.
- [23]: Majta, J., Lenard, J.G., Pietrzyk, M. Modelling the Evolution of the Microstructure of a Nb Steel, *ISIJ Int.*, 36:8 (1996): 1094-1102.
- [24]: van Vlack, L.H. (1980). *Elements of Materials Science and Engineering* 4th edn. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Phillipine.
- [25]: Samuel, F.H., Yue, S., Jonas, J.J., Barnes, K.R. Effect of Dynamic Recrystallization on Microstructural Evolution during Strip Rolling, *ISIJ Int.*, 30:3 (1990), 216-225.
- [26]: Wu, D., Li, Z. Effect of Thermomechanical Controlled Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe–C–Mn–Si Multiphase Steels, *ISIJ Int.*, 46:7 (2006), 1059-1066.
- [27]: Yamanaka, A., Takaki, T., Tomita, Y. Simulation of Austenite-to-ferrite Transformation in Deformed Austenite by Crystal Plasticity Finite Element Method and Multi-phase-field Method, *ISIJ Int.*, 52:4 (2012), 659-668.
- [28]: Kvacakaj, T., Mamuzic, I. A Quantitative Characterization of Austenite Microstructure after Deformation in Nonrecrystallization Region and Its Influence on Ferrite Microstructure after Transformation, *ISIJ Int.*, 38:11 (1998): 1270-1276.
- [29]: Ferreira, J.L., Melo, T.M.F., Bott, I.S., Santos, D.B., Rios, P.R. Influence of Thermomechanical Parameters on the Competition between Dynamic Recrystallization and Dynamic Strain Induced Transformation in C–Mn and C–Mn–Nb Steels Deformed by Hot Torsion, *ISIJ Int.*, 47:11 (2007), 1638-1646.
- [30]: Zheng, C., Xiao, N., Li, D., Li, Y. Microstructure prediction of the austenite recrystallization during multi-pass steel strip hot rolling: A cellular automaton modeling, *Computational Materials Science*, 44 (2008), 507-514.

- [31]: Yoshida, H., Yorifuji, A., Koseki, S., Saeki, M. An Integrated Mathematical Simulation of Temperatures, Rolling Loads and Metallurgical Properties in Hot Strip Mills, *ISIJ Int.*, 31:6 (1991): 571-576.
- [32]: Senuma, T., Suehiro, M., Yada, H. Mathematical Models for Predicting Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot Strips, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992): 423-432.
- [33]: Nakata, N., Militzer, M. Modelling of Microstructure Evolution During Hot Rolling of a 780 MPa High Strength Steel, *ISIJ Int.*, 45:1 (2005): 82-90.
- [34]: Maccagno, T.M., Jonas, J.J., Yue, S., McCrady, B.J., Slobodian, R., Deeks, D. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results, *ISIJ Int.*, 34:11 (1994): 917-922.
- [35]: Yuan, X.Q., Liu, Z.Y., Jiao, S.H., Ma, L.Q., Wang, G.D. The Onset Temperatures of γ to α -Phase Transformation in Hot Deformed and Non-deformed Nb Micro-alloyed Steels, *ISIJ Int.*, 46:4 (2006), 579-585.
- [36]: Pietrzyk, M., Roucoules, C., Hodgson, P.D. Modelling the Thermomechanical and Microstructural Evolution During Rolling of a Nb HSLA Steels, *ISIJ Int.*, 35:5 (1995), 531-541.
- [37]: Lan, L.Y., Qiu, C.L., Zhao, D.W., Gao, X.H., Du, L.X. Dynamic and Static Recrystallization Behavior of Low Carbon High Niobium Microalloyed Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18:1 (2011), 55-60.
- [38]: Yu, Q., Wang, Z., Liu, X., Wang, G. The Effect of Delay Time after Hot Rolling on the Grain Size of Ferrite, *ISIJ Int.*, 44:4 (2004), 710-716.
- [39]: Hodgson, P.D., Gibbs, R.K. A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels, *ISIJ Int.*, 32:12 (1992), 1329-1338.
- [40]: Saito, Y., Shiga, C. Computer Simulation of Microstructural Evolution in Thermomechanical Processing of Steel Plates, *ISIJ Int.*, 32:3 (1992), 414-422.

- [41]: Hanlon, D.N., Sietsma, J., van der Zwaag, S. The Effect of Plastic Deformation of Austenite on the Kinetics of Subsequent Ferrite Formation, *ISIJ Int.*, 41:9 (2001), 1028-1036.
- [42]: Matja, J., Zurek, A.K., Cola, M., Hochnadel, P., Pietrzyk, M. An Integrated Computer Model With Applications For Austenite to Ferrite Transformation During Hot Deformation of Nb-Microalloyed Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.33A (2002), 1509-1520.
- [43]: Napitupulu, R.A.M. (2012). Studi Hubungan Butir Ferrit Hasil Canai Panas Kondisi Regangan Bidang dengan Canai Panas pada Baja HSLA, Disertasi. FTUI: Depok.
- [44]: ASTM Standard E112, "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size," ASTM International, West Conshohocken, PA, (1996).
- [45]: ASTM Standard E92, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, (2003).
- [46]: Majta, J., Zurek, A.K. Modelling of Ferrite Structure After Deformation in the Two-Phase Region. *International Journal of Plasticity*, Vol.19 (2003), 707-730.
- [47]: Eghbali, B., Zadeh, A.A. Mechanism of Ferrite Grain Refinement During Warm Deformation of a Low Carbon Nb-Microalloyed Steel. *Materials Science and Engineering A*, 457 (2007), 219-225.
- [48]: Eghbali, B., Zadeh, A.A. Effect of Strain Rate on the Ferrite Grain Refinement in a Low Carbon Nb-Ti Microalloyed Steel during Low Temperature Deformation. *J. Mater. Sci. Technol.*, 21:6 (2005), 851-855.
- [49]: Eghbali, B. Study of Ferrite Grain Refinement During Intercritical Deformation of Microalloyed Steel. *Materials Science and Engineering A*, 527 (2010), 3407-3410.

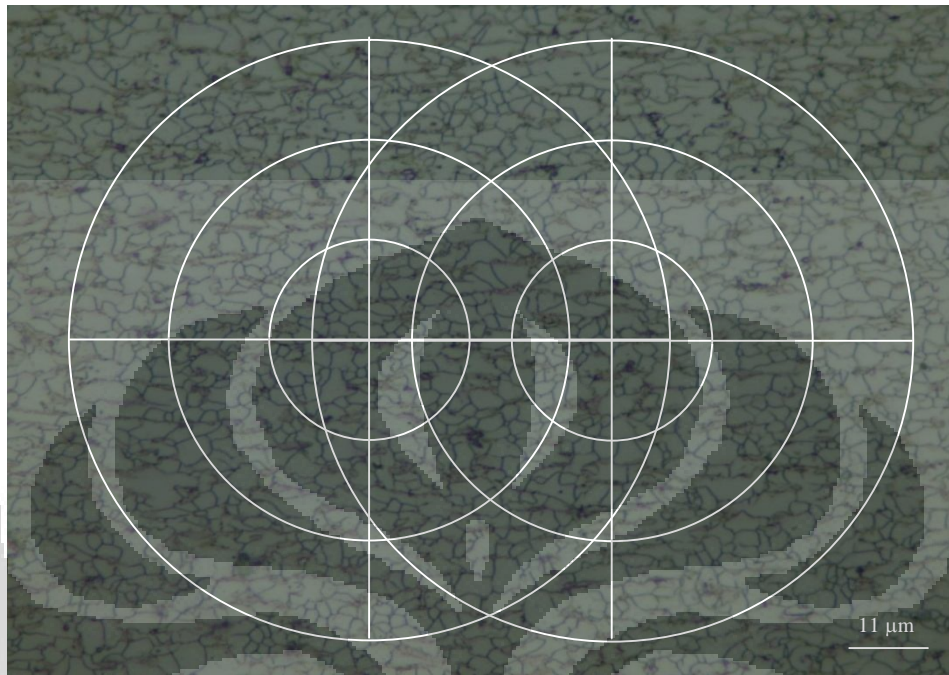


LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Ukuran Butir Ferrit

Sampel 2 Titik 1 ($2,974 \pm 0,065 \mu\text{m}$)

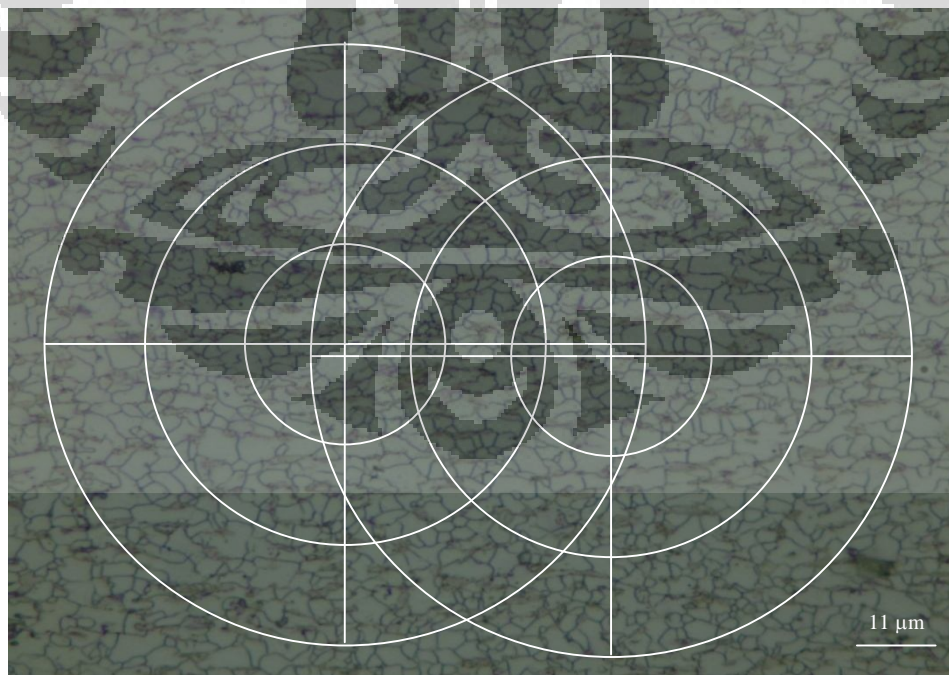
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $99 + 67 + 33 = 199$, lingkaran 2 = $90 + 59 + 32 = 181$

Rata-rata perpotongan = $(199 + 181)/2 = 190$ titik potong

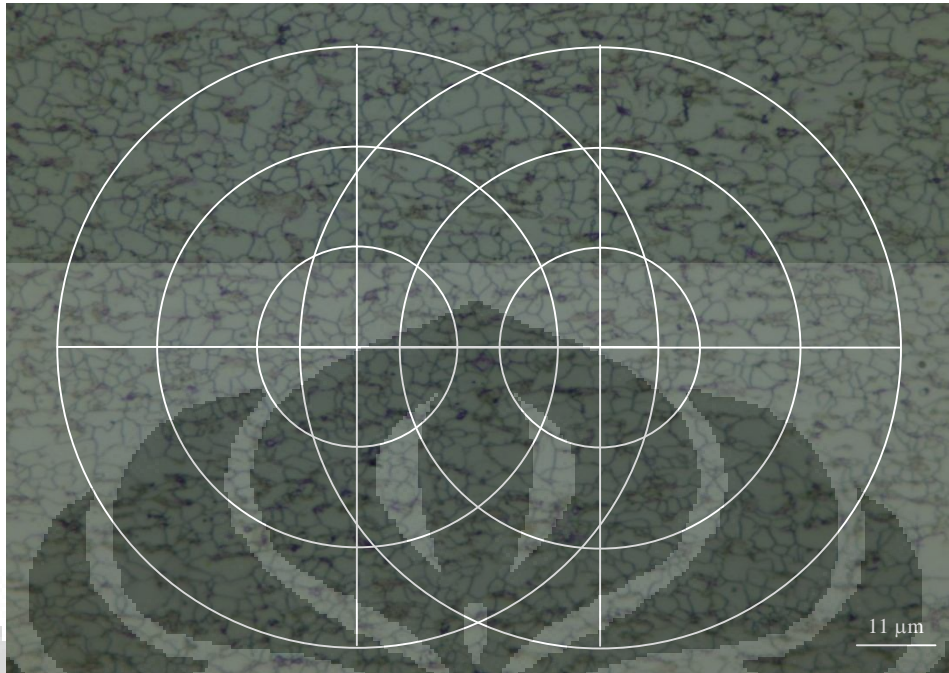
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $85 + 64 + 34 = 183$, lingkaran 2 = $98 + 58 + 31 = 187$

Rata-rata perpotongan = $(183 + 187)/2 = 185$ titik potong

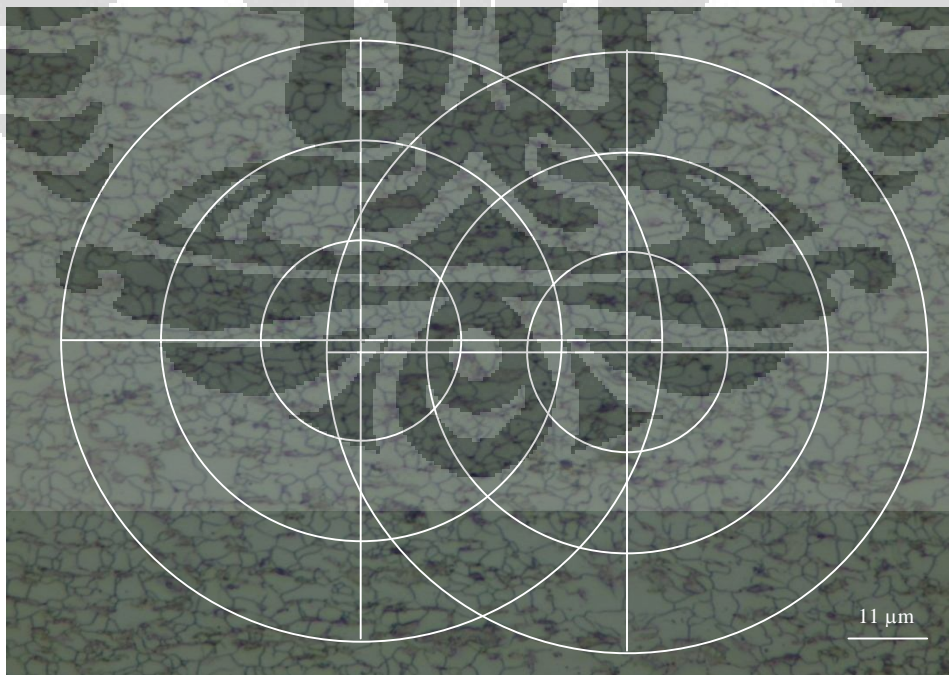
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $90 + 62 + 36 = 188$, lingkaran 2 = $92 + 66 + 27 = 185$

Rata-rata perpotongan = $(188 + 185)/2 = 186,5$ titik potong

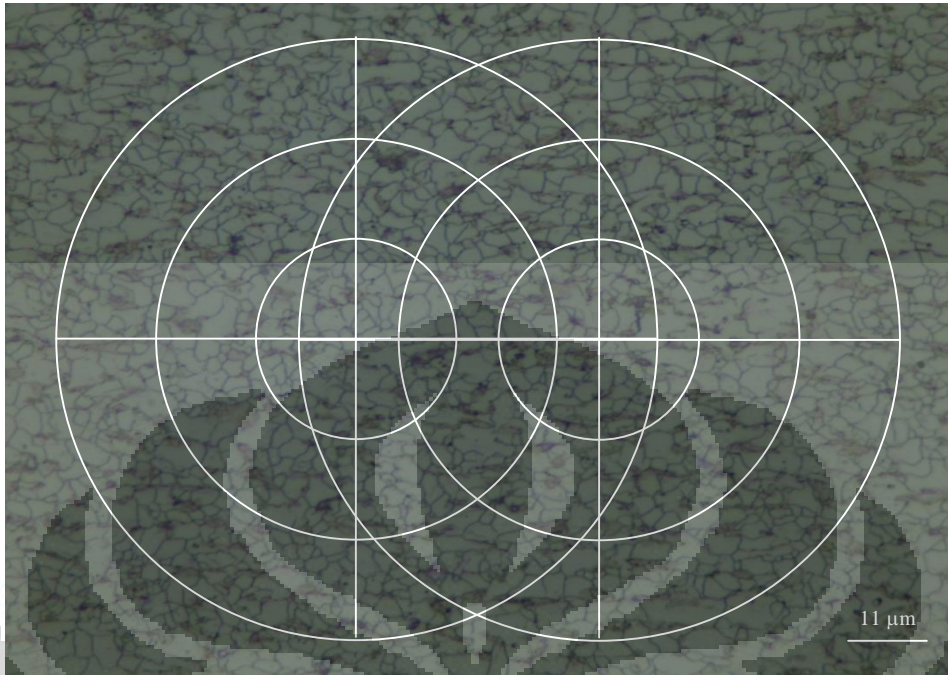
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $96 + 64 + 36 = 196$, lingkaran 2 = $91 + 54 + 32 = 177$

Rata-rata perpotongan = $(196 + 177)/2 = 186,5$ titik potong

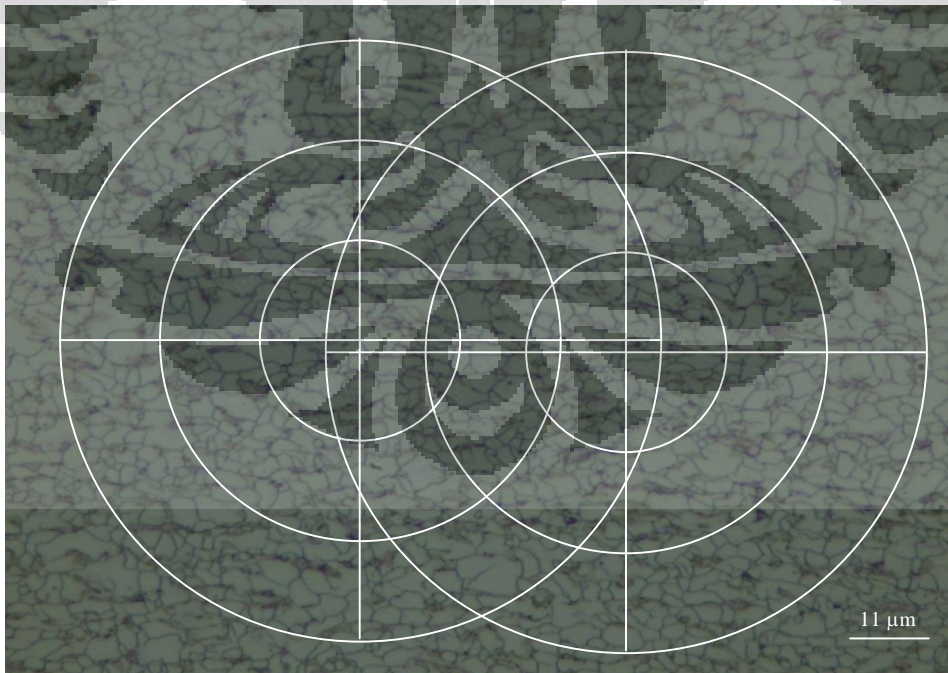
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $99 + 60 + 32 = 191$, lingkaran 2 = $100 + 60 + 34 = 194$

Rata-rata perpotongan = $(191 + 194)/2 = 192,5$ titik potong

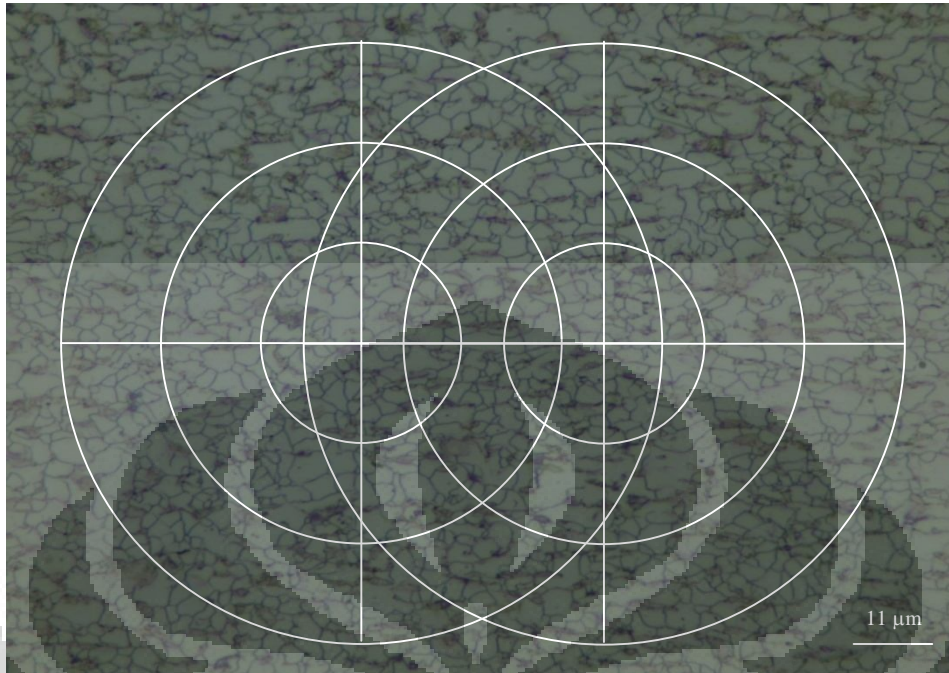
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $94 + 61 + 30 = 185$, lingkaran 2 = $98 + 65 + 38 = 201$

Rata-rata perpotongan = $(185 + 201)/2 = 193$ titik potong

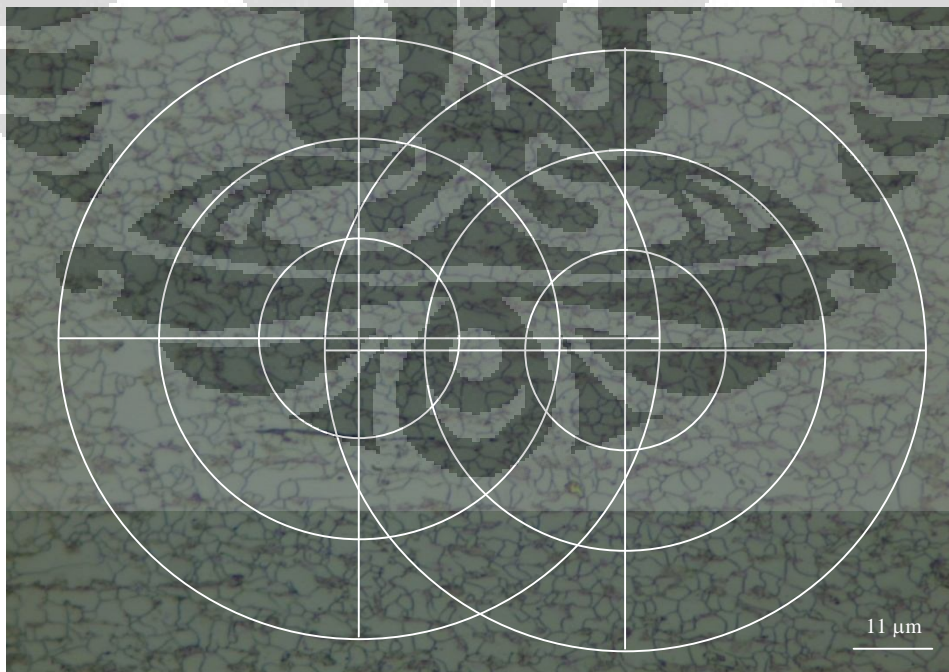
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $95 + 64 + 35 = 194$, lingkaran 2 = $97 + 67 + 37 = 201$

Rata-rata perpotongan = $(194 + 201)/2 = 197,5$ titik potong

8.

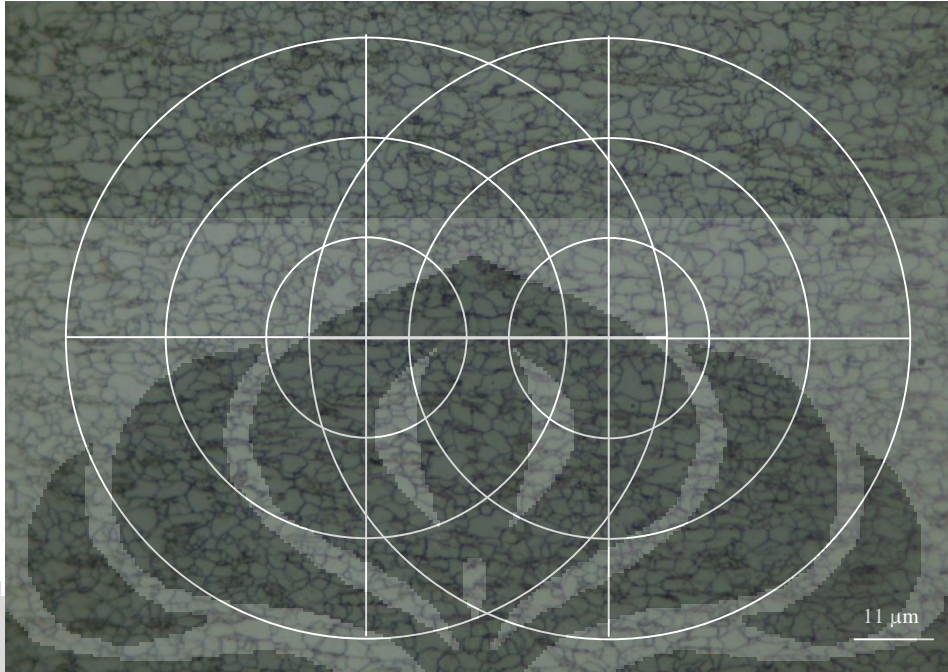


Perpotongan lingkaran 1 = $91 + 61 + 31 = 183$, lingkaran 2 = $96 + 61 + 38 = 195$

Rata-rata perpotongan = $(183 + 195)/2 = 189$ titik potong

Sampel 2 Titik 2 ($2,538 \pm 0,051 \mu\text{m}$)

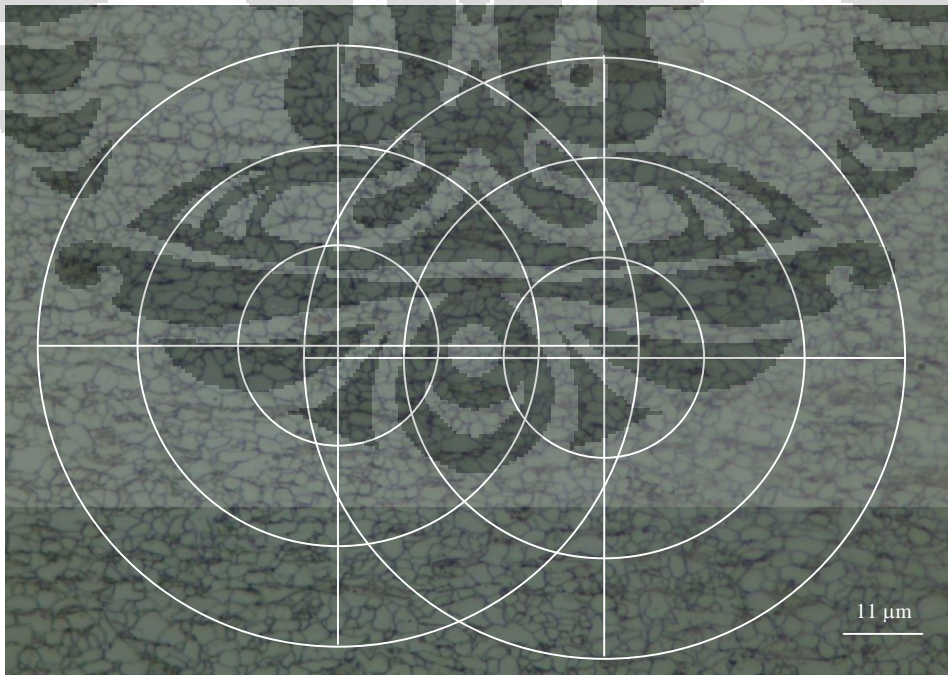
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $110 + 72 + 36 = 218$, lingkaran 2 = $108 + 78 + 38 = 224$

Rata-rata perpotongan = $(218 + 224)/2 = 221$ titik potong

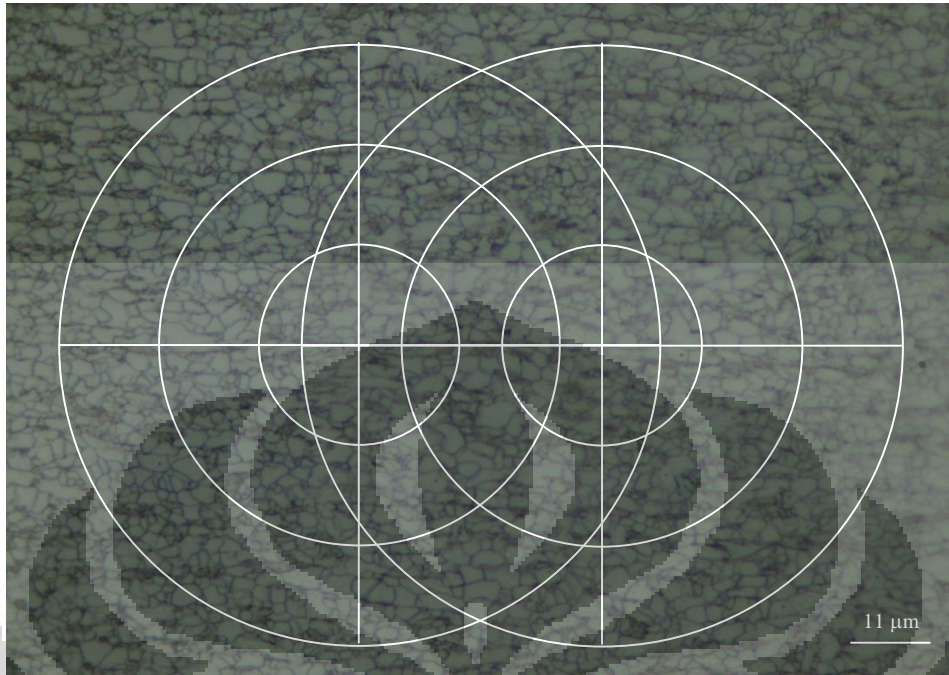
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $109 + 81 + 34 = 224$, lingkaran 2 = $105 + 80 + 38 = 223$

Rata-rata perpotongan = $(224 + 223)/2 = 223,5$ titik potong

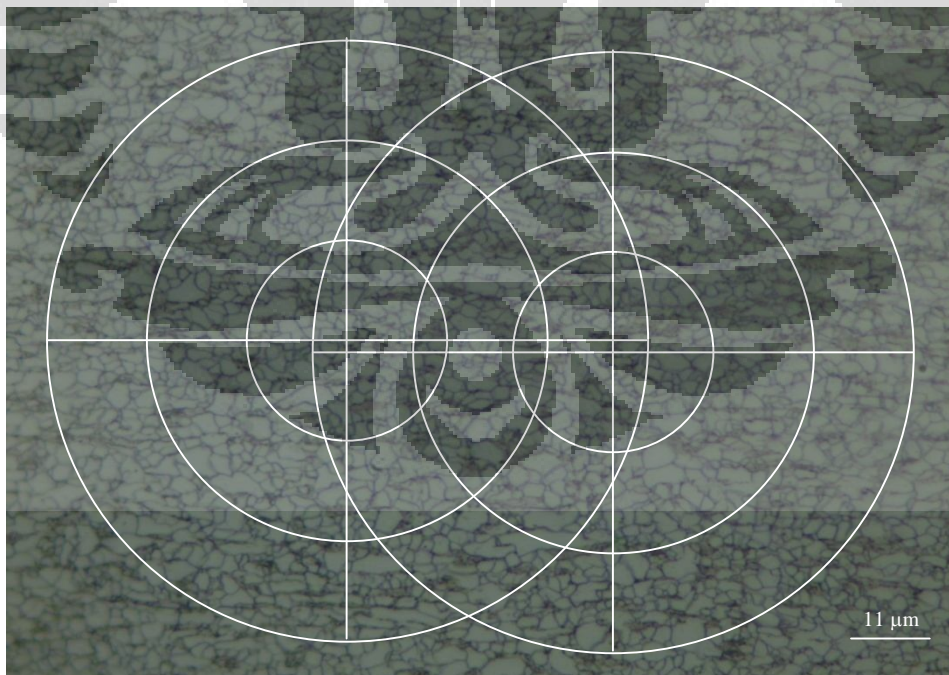
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $107 + 75 + 37 = 219$, lingkaran 2 = $105 + 73 + 36 = 214$

Rata-rata perpotongan = $(219 + 214)/2 = 216,5$ titik potong

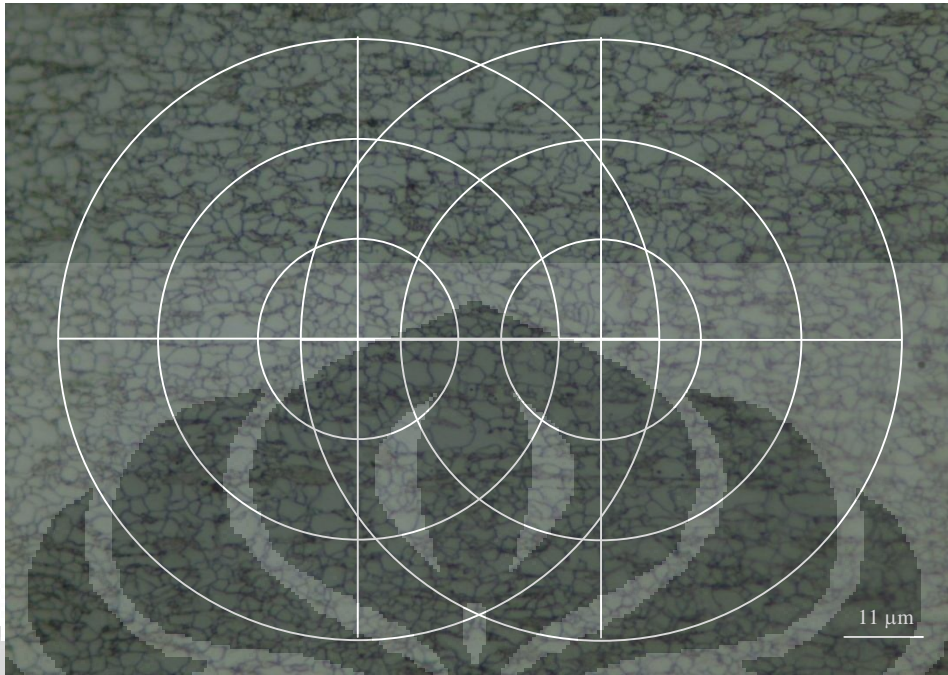
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $112 + 83 + 42 = 237$, lingkaran 2 = $113 + 78 + 37 = 228$

Rata-rata perpotongan = $(237 + 228)/2 = 232,5$ titik potong

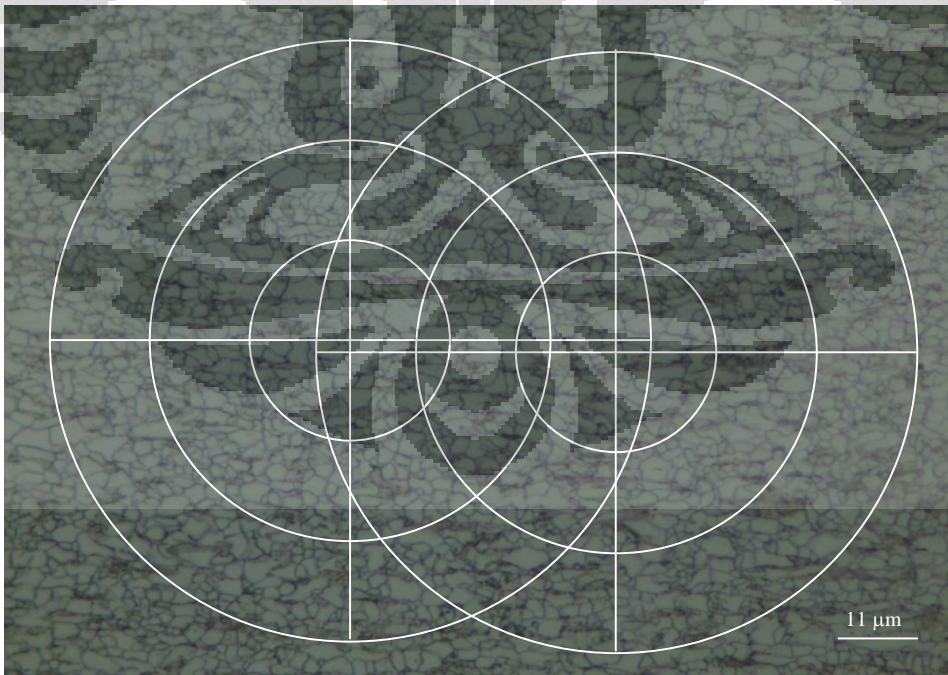
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $113 + 77 + 37 = 227$, lingkaran 2 = $110 + 74 + 38 = 222$

Rata-rata perpotongan = $(227 + 222)/2 = 224,5$ titik potong

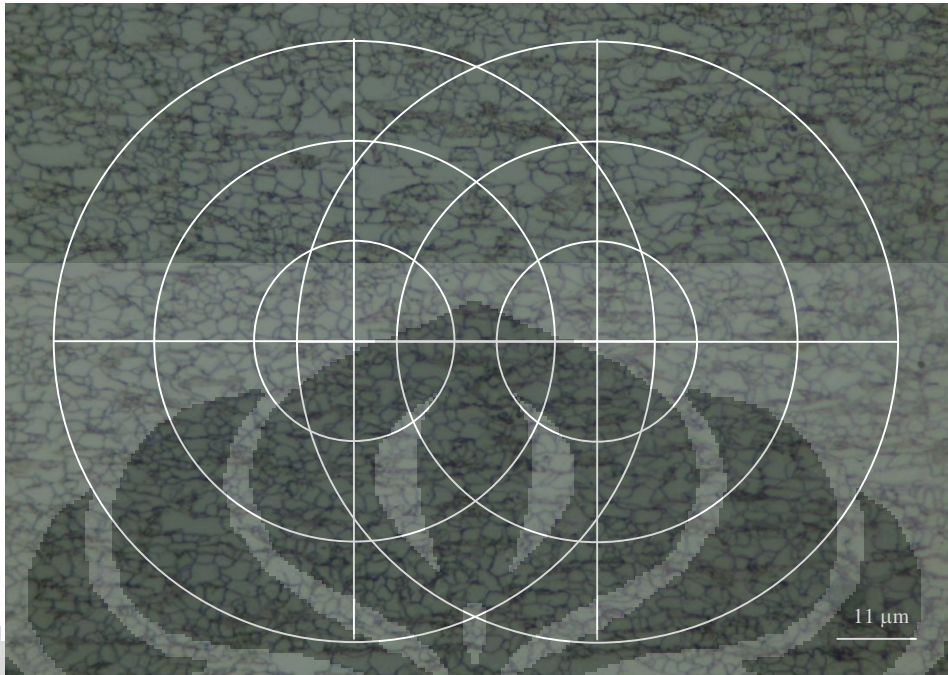
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $104 + 74 + 37 = 215$, lingkaran 2 = $111 + 76 + 37 = 224$

Rata-rata perpotongan = $(215 + 224)/2 = 219,5$ titik potong

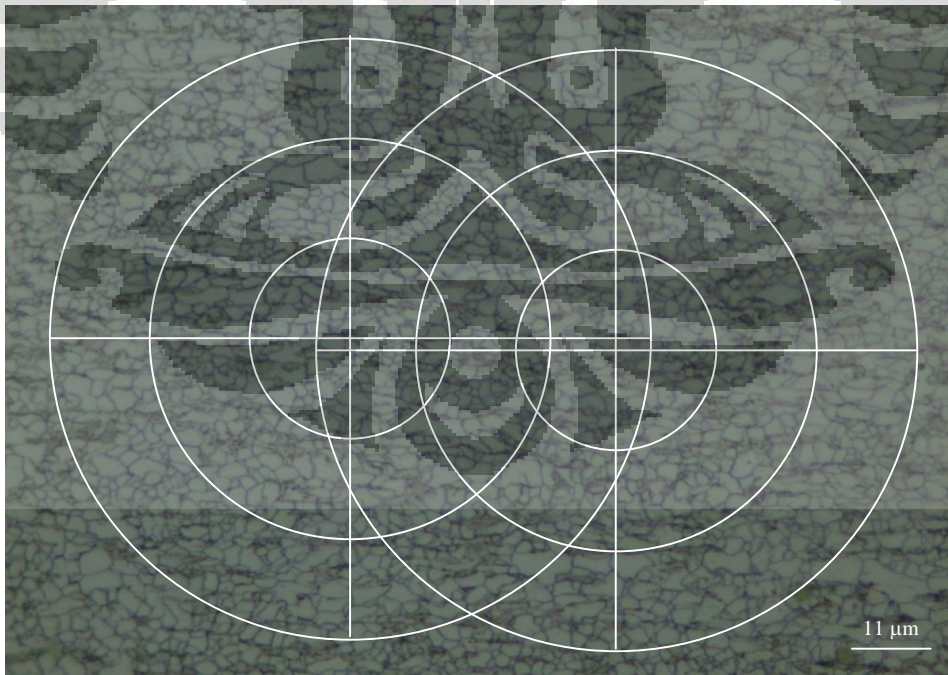
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $108 + 73 + 38 = 219$, lingkaran 2 = $111 + 77 + 42 = 230$

Rata-rata perpotongan = $(219 + 230)/2 = 224,5$ titik potong

8.

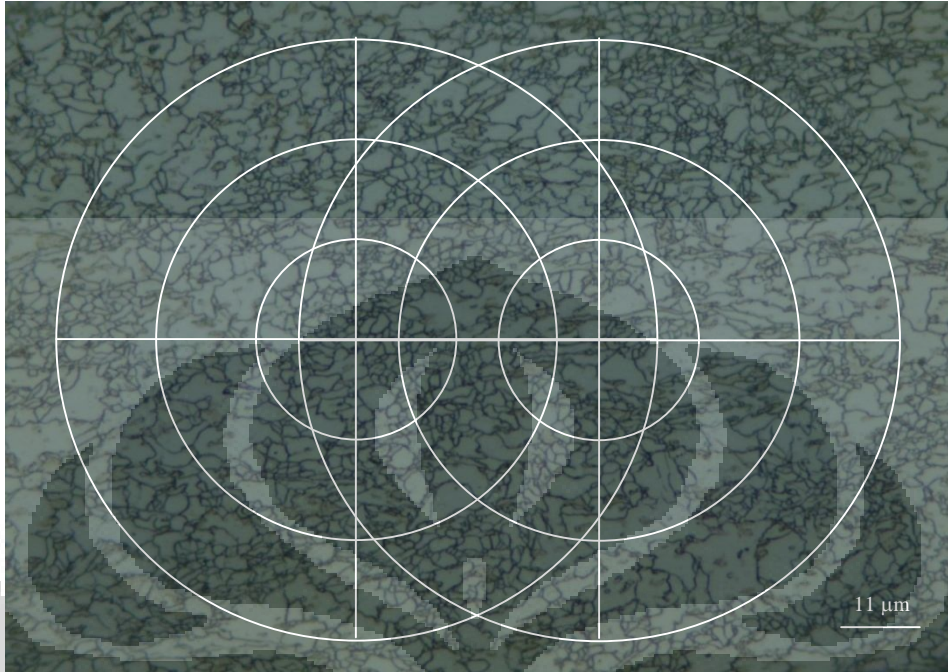


Perpotongan lingkaran 1 = $107 + 75 + 40 = 222$, lingkaran 2 = $106 + 77 + 41 = 224$

Rata-rata perpotongan = $(222 + 224)/2 = 223$ titik potong

Sampel 2 Titik 3 ($2,423 \pm 0,159 \mu\text{m}$)

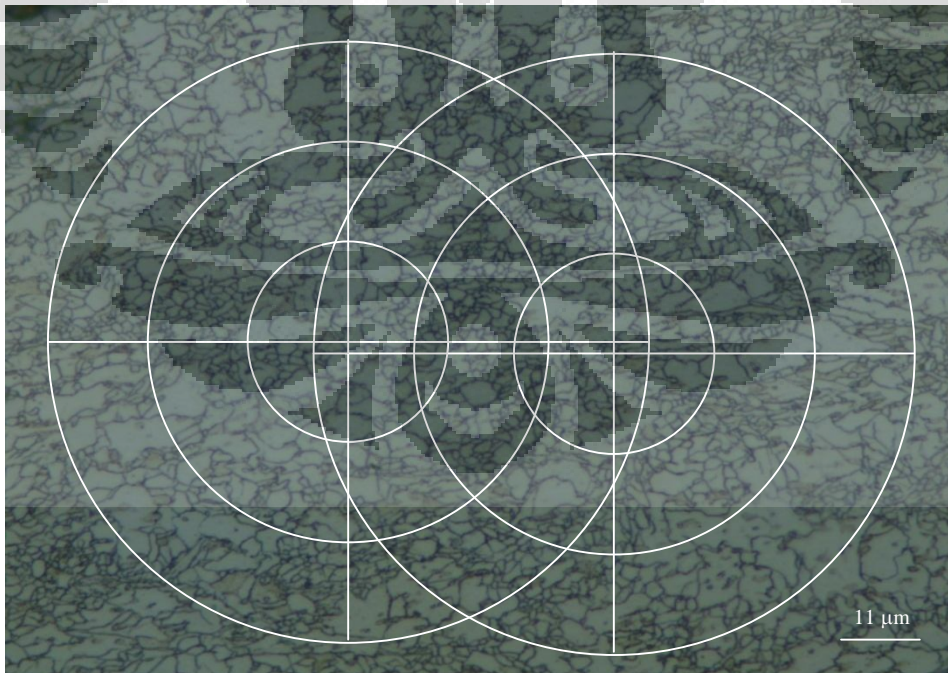
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $96 + 70 + 34 = 200$, lingkaran 2 = $105 + 72 + 35 = 212$

Rata-rata perpotongan = $(200 + 212)/2 = 206$ titik potong

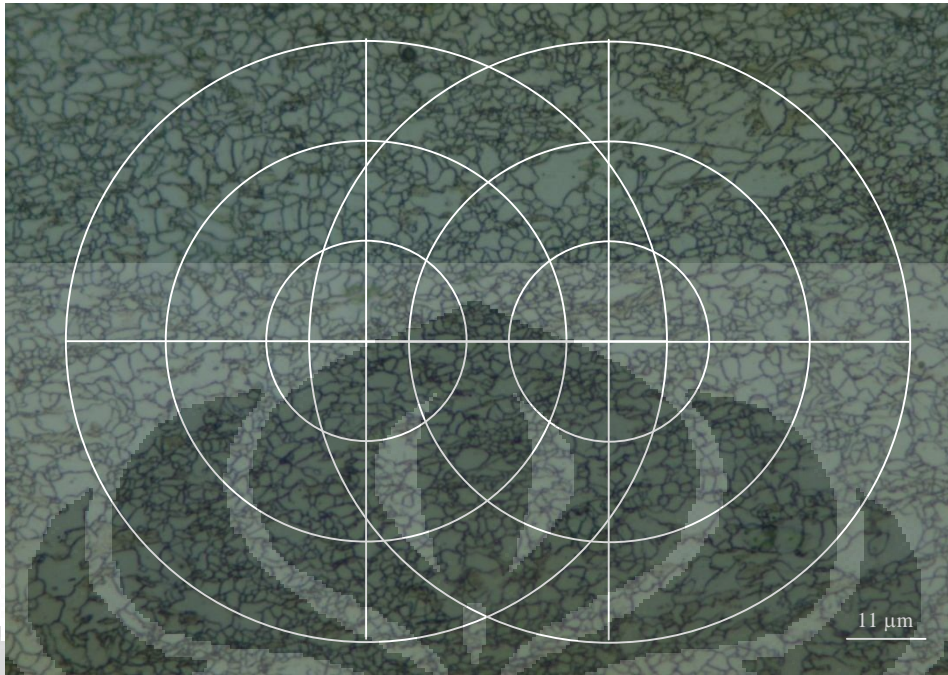
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $100 + 66 + 35 = 201$, lingkaran 2 = $90 + 81 + 38 = 209$

Rata-rata perpotongan = $(201 + 209)/2 = 205$ titik potong

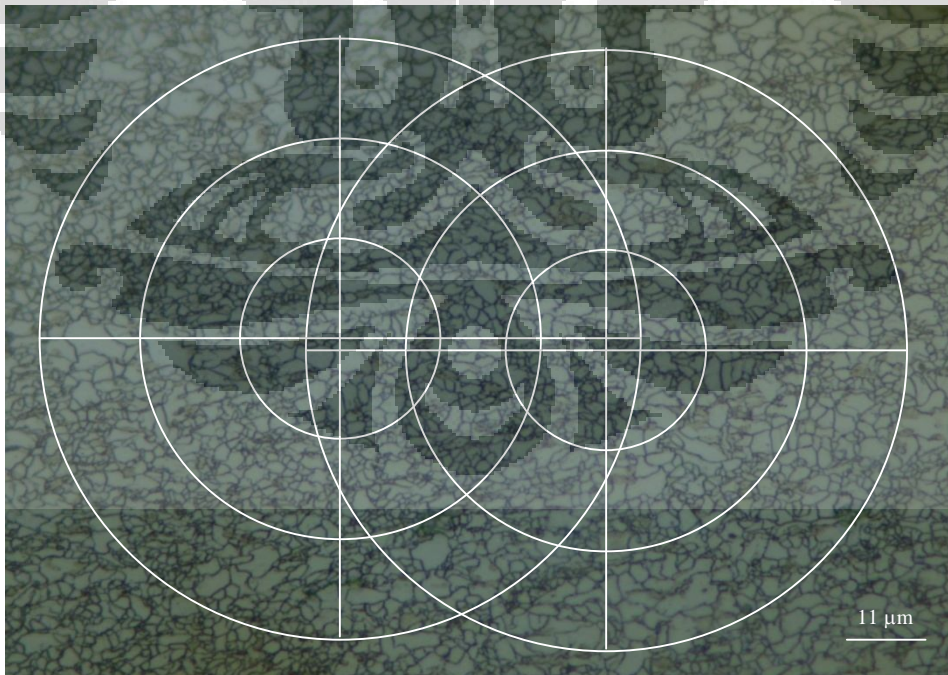
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $113 + 88 + 40 = 241$, lingkaran 2 = $115 + 71 + 47 = 233$

Rata-rata perpotongan = $(241 + 233)/2 = 237$ titik potong

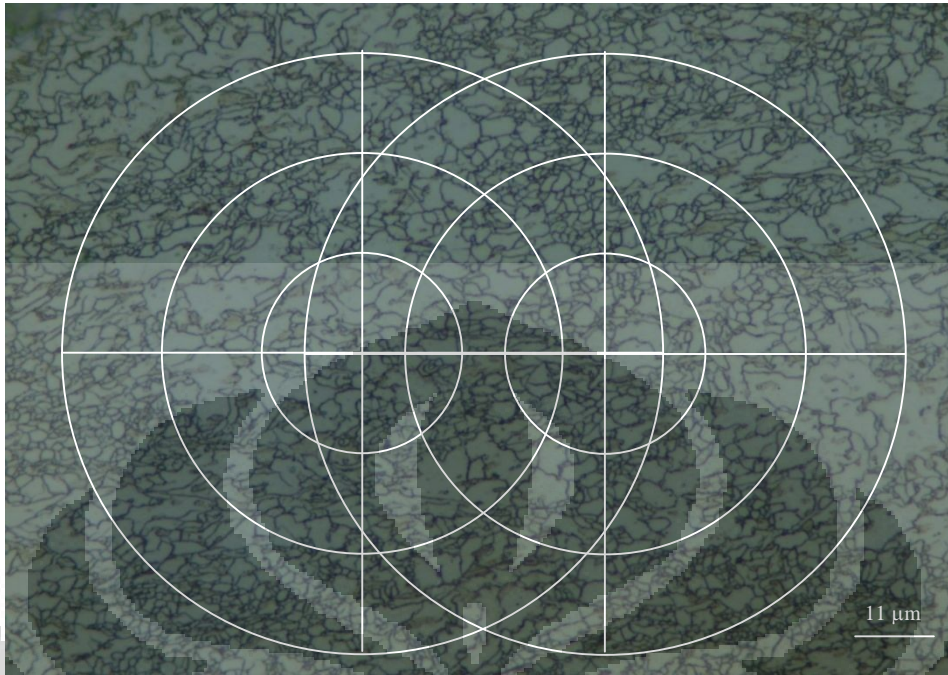
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $130 + 87 + 45 = 262$, lingkaran 2 = $125 + 82 + 38 = 245$

Rata-rata perpotongan = $(262 + 245)/2 = 253,5$ titik potong

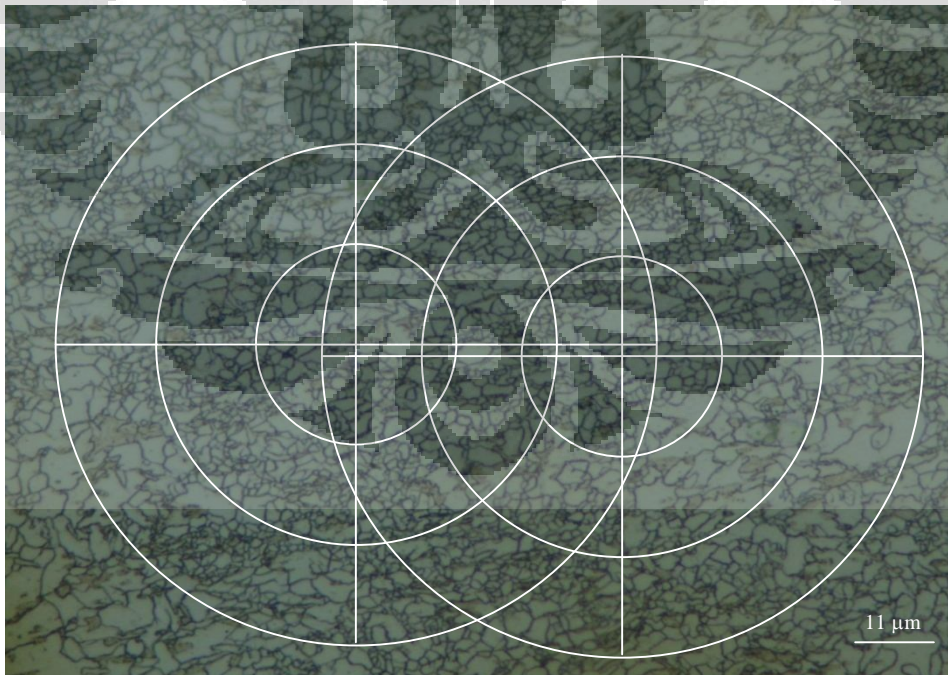
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $113 + 80 + 30 = 223$, lingkaran 2 = $100 + 58 + 41 = 199$

Rata-rata perpotongan = $(223 + 199)/2 = 211$ titik potong

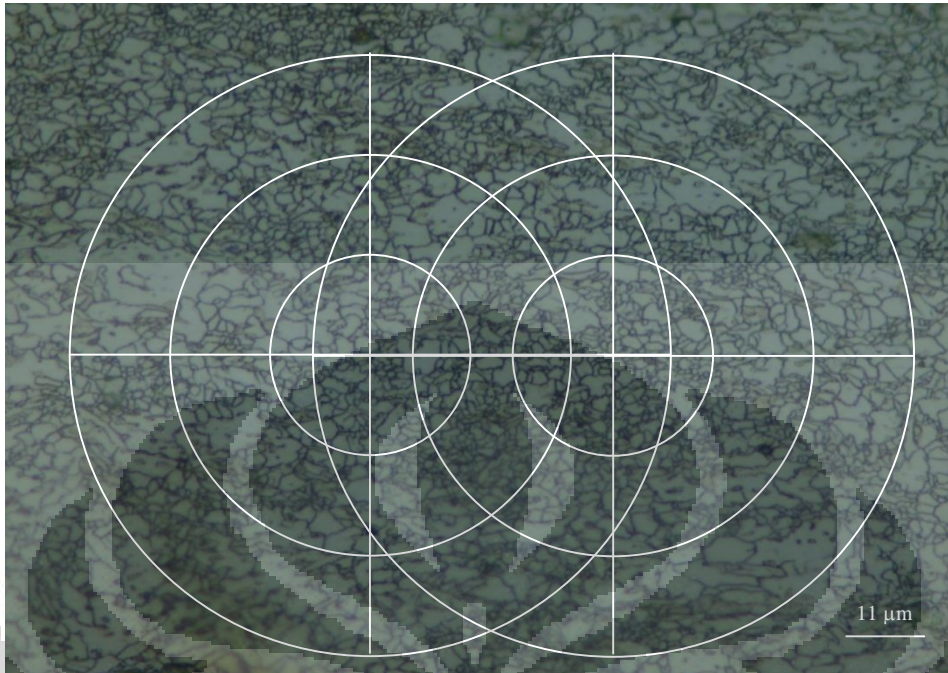
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $119 + 76 + 40 = 241$, lingkaran 2 = $109 + 79 + 38 = 226$

Rata-rata perpotongan = $(241 + 226)/2 = 233,5$ titik potong

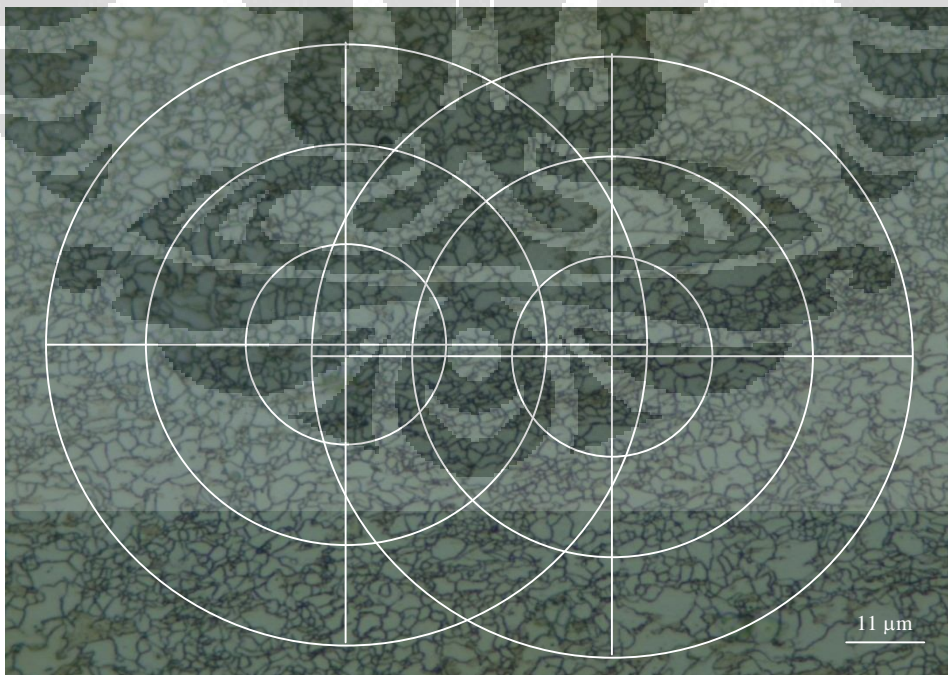
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $101 + 71 + 40 = 212$, lingkaran 2 = $98 + 68 + 42 = 208$

Rata-rata perpotongan = $(212 + 208)/2 = 210$ titik potong

8.

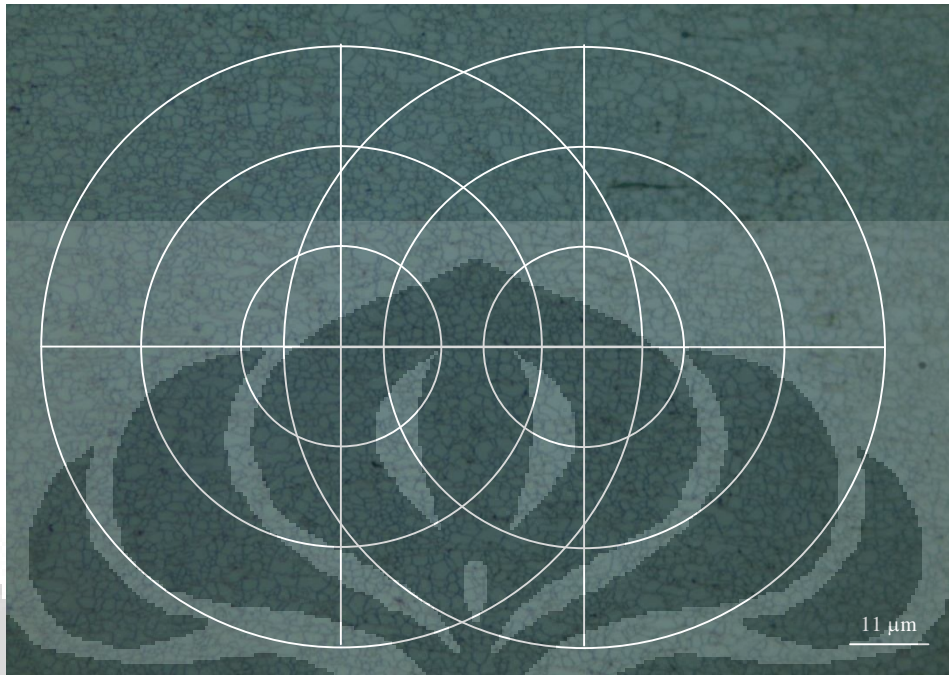


Perpotongan lingkaran 1 = $123 + 71 + 43 = 237$, lingkaran 2 = $114 + 88 + 40 = 242$

Rata-rata perpotongan = $(237 + 242)/2 = 239,5$ titik potong

Sampel 2 Titik 4 ($2,057 \pm 0,032 \mu\text{m}$)

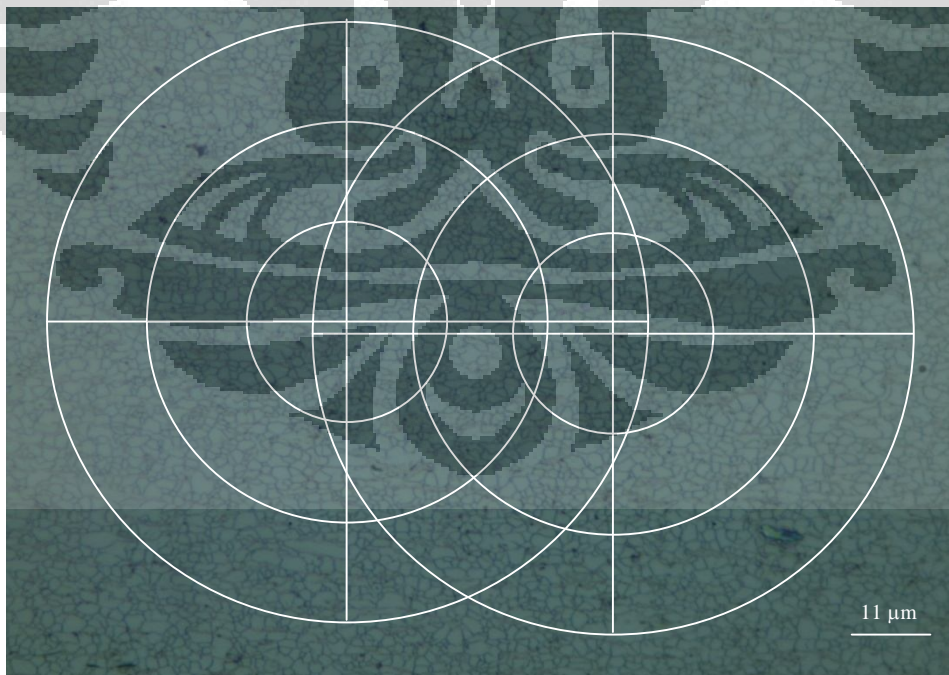
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $132 + 95 + 53 = 280$, lingkaran 2 = $134 + 93 + 50 = 277$

Rata-rata perpotongan = $(280 + 277)/2 = 278,5$ titik potong

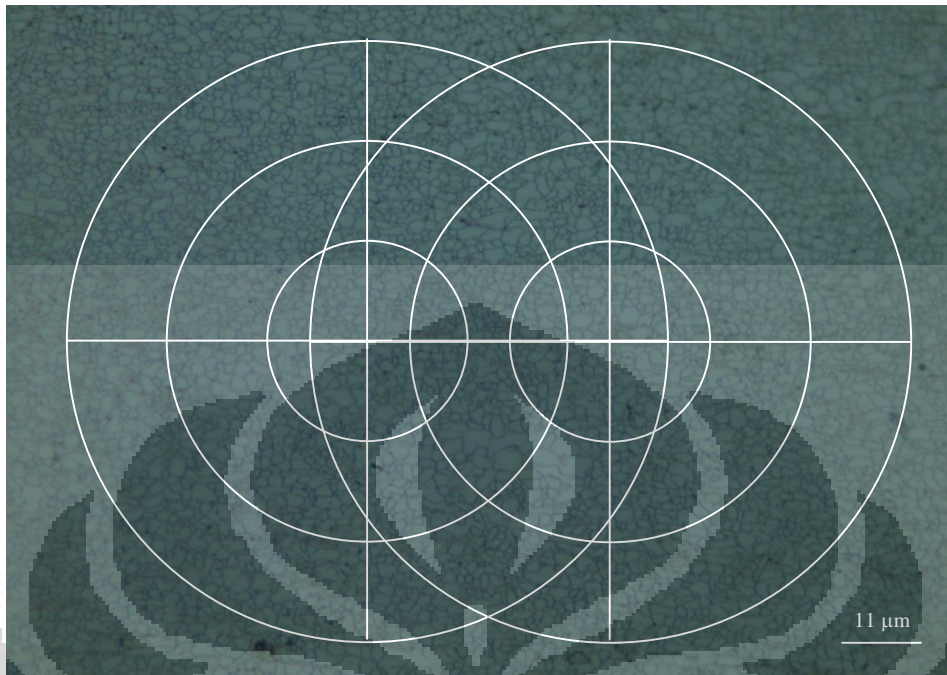
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $146 + 103 + 51 = 300$, lingkaran 2 = $132 + 89 + 52 = 273$

Rata-rata perpotongan = $(300 + 273)/2 = 286,5$ titik potong

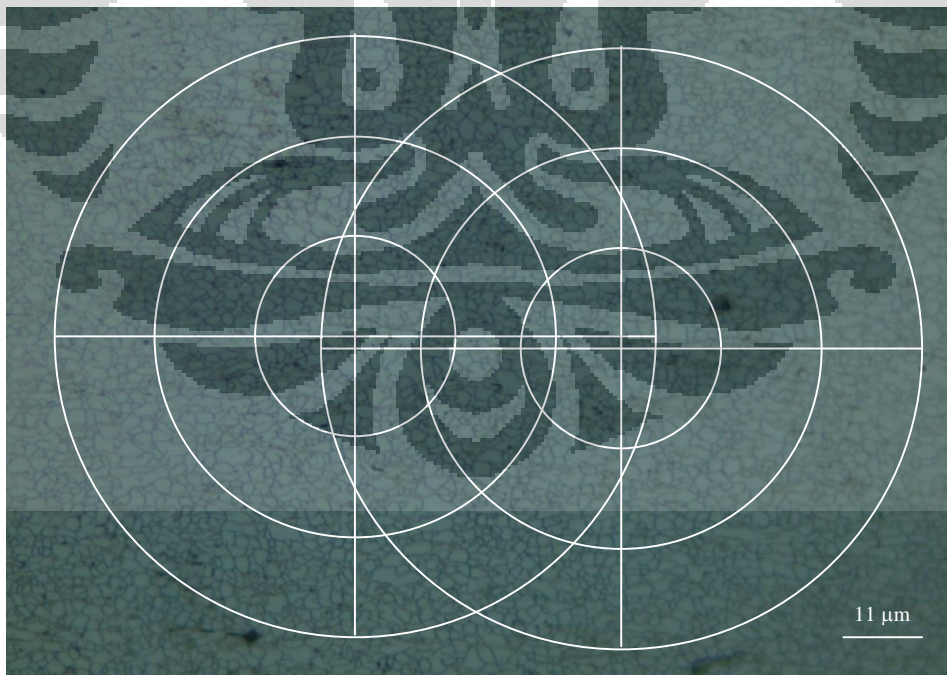
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $135 + 102 + 48 = 285$, lingkaran 2 = $130 + 98 + 53 = 271$

Rata-rata perpotongan = $(285 + 271)/2 = 278$ titik potong

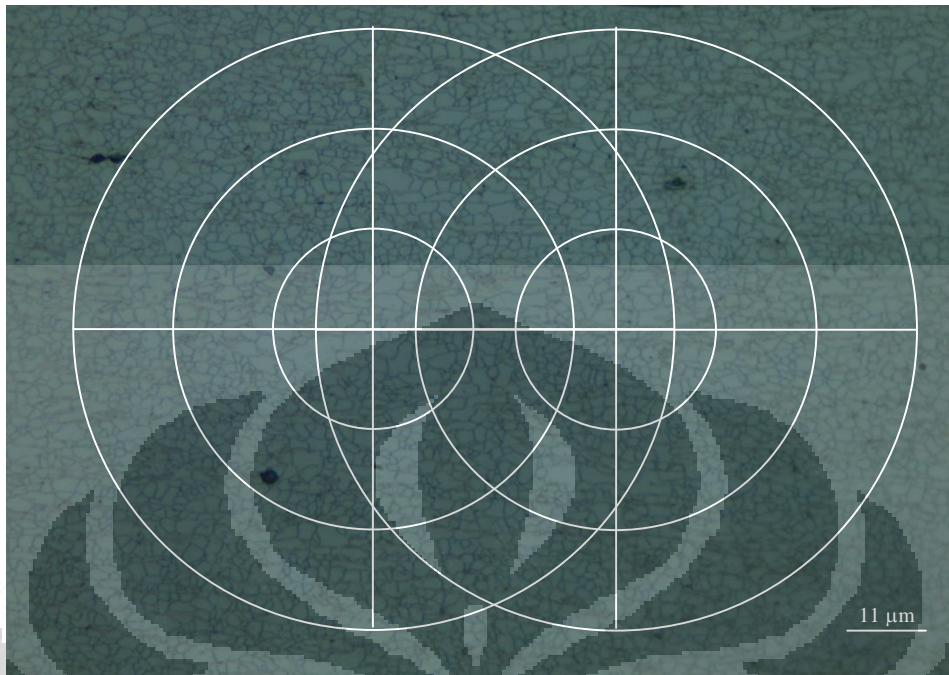
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $134 + 91 + 47 = 272$, lingkaran 2 = $135 + 90 + 47 = 272$

Rata-rata perpotongan = $(272 + 272)/2 = 272$ titik potong

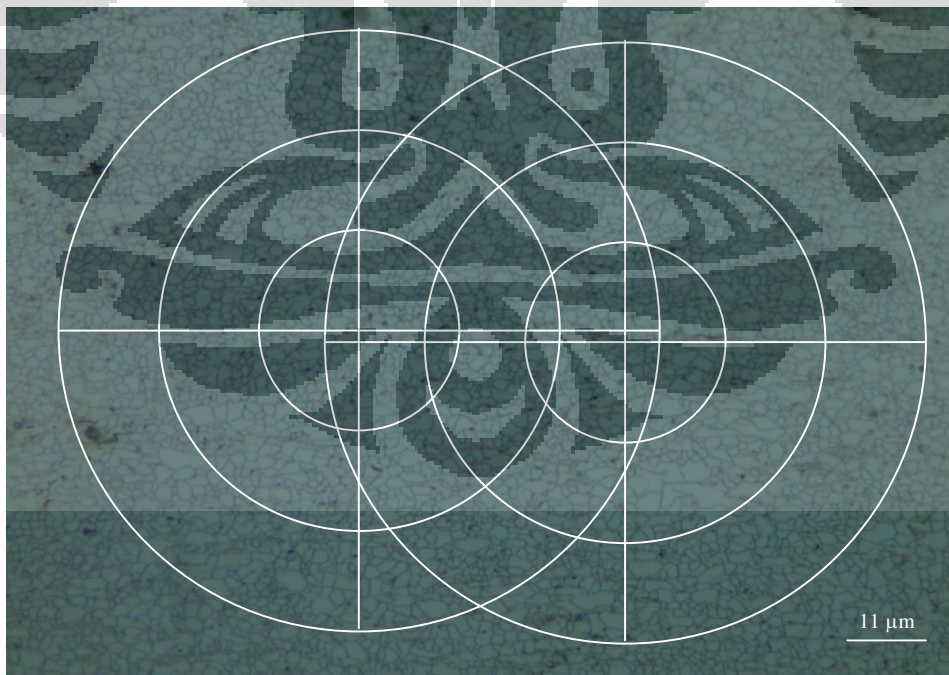
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $136 + 96 + 48 = 280$, lingkaran 2 = $133 + 90 + 50 = 273$

Rata-rata perpotongan = $(280 + 273)/2 = 276,5$ titik potong

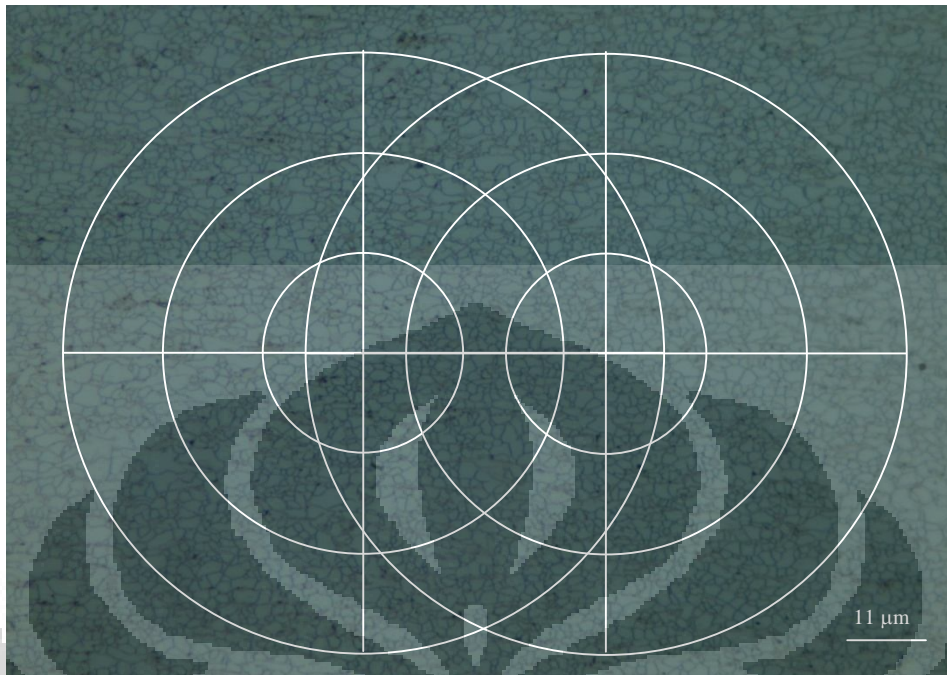
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $140 + 92 + 50 = 282$, lingkaran 2 = $138 + 92 + 49 = 279$

Rata-rata perpotongan = $(282 + 279)/2 = 280,5$ titik potong

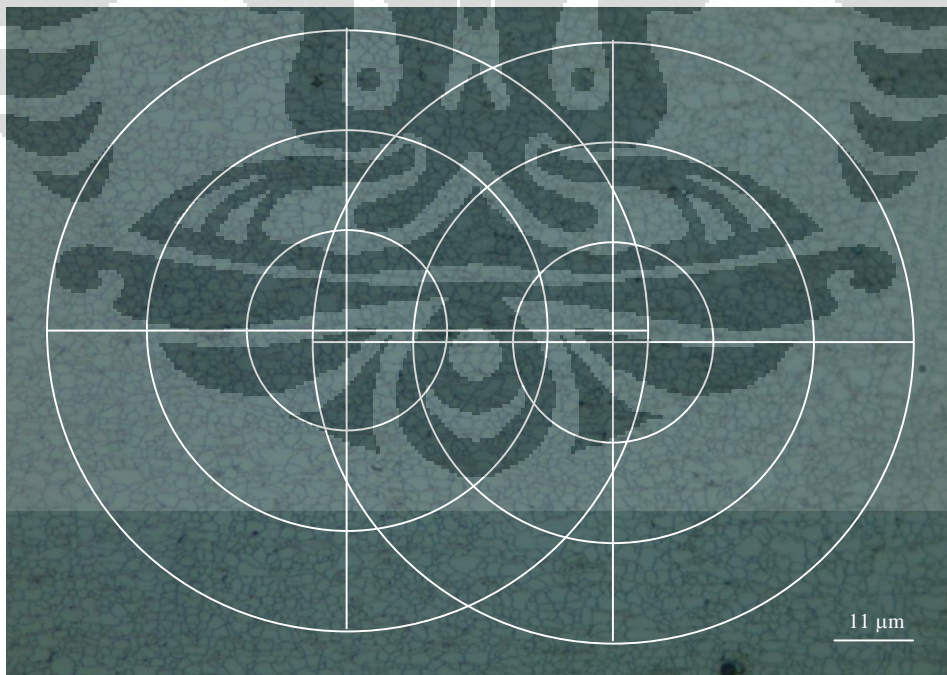
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $133 + 95 + 52 = 280$, lingkaran 2 = $136 + 97 + 51 = 284$

Rata-rata perpotongan = $(280 + 284)/2 = 282$ titik potong

8.

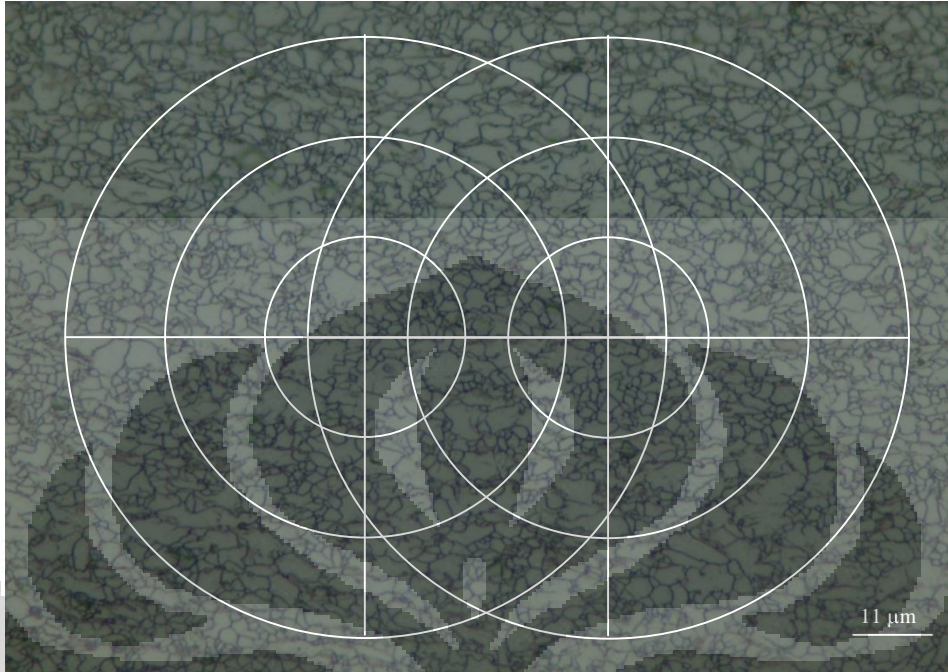


Perpotongan lingkaran 1 = $133 + 92 + 48 = 273$, lingkaran 2 = $138 + 88 + 48 = 274$

Rata-rata perpotongan = $(273 + 274)/2 = 273,5$ titik potong

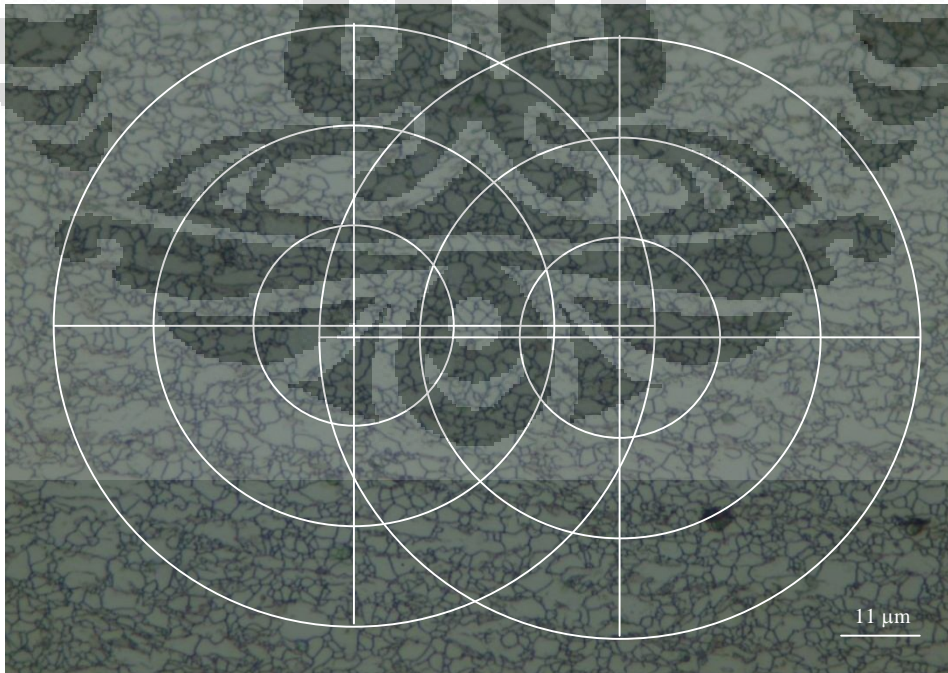
Sampel 4 Titik 1 ($2,415 \pm 0,052 \mu\text{m}$)

1.



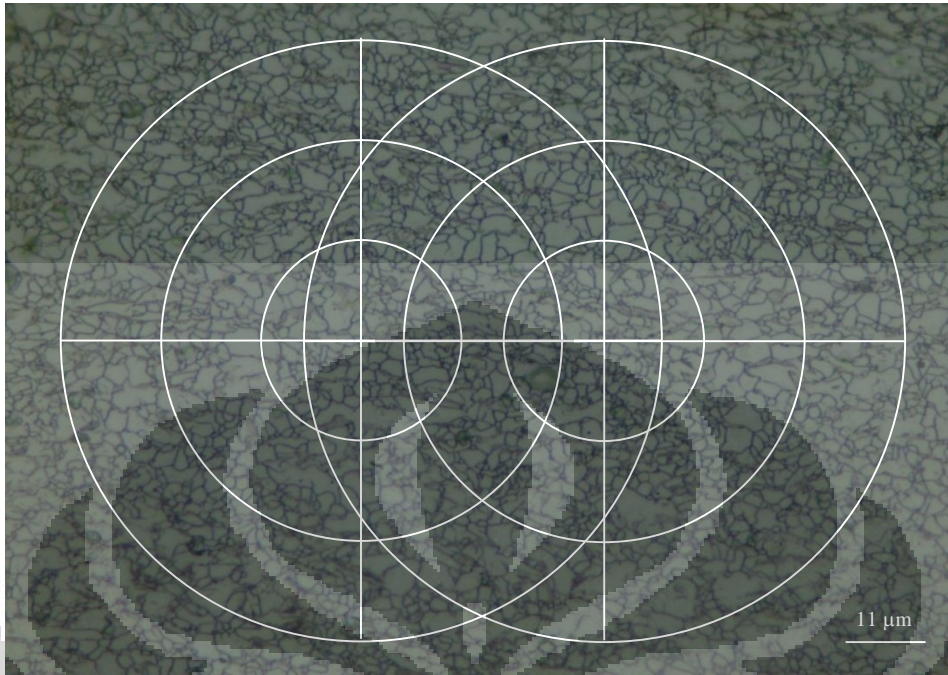
Perpotongan lingkaran 1 = $120 + 80 + 43 = 243$, lingkaran 2 = $118 + 80 + 37 = 235$
 Rata-rata perpotongan = $(243 + 235)/2 = 239$ titik potong

2.



Perpotongan lingkaran 1 = $112 + 78 + 38 = 228$, lingkaran 2 = $107 + 75 + 43 = 225$
 Rata-rata perpotongan = $(228 + 225)/2 = 226,5$ titik potong

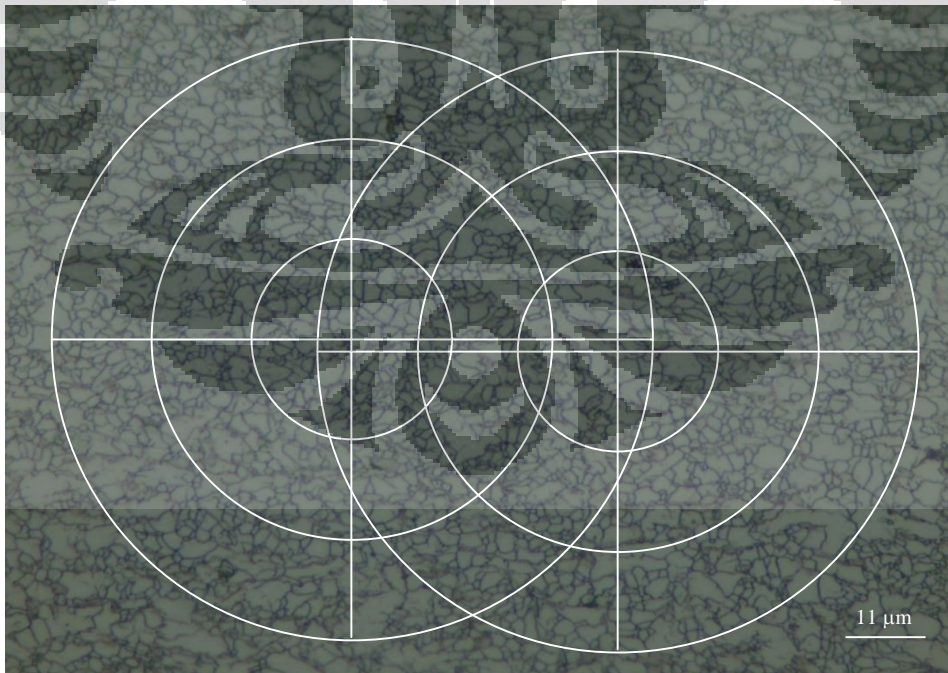
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $122 + 84 + 37 = 243$, lingkaran 2 = $126 + 77 + 40 = 243$

Rata-rata perpotongan = $(243 + 243)/2 = 243$ titik potong

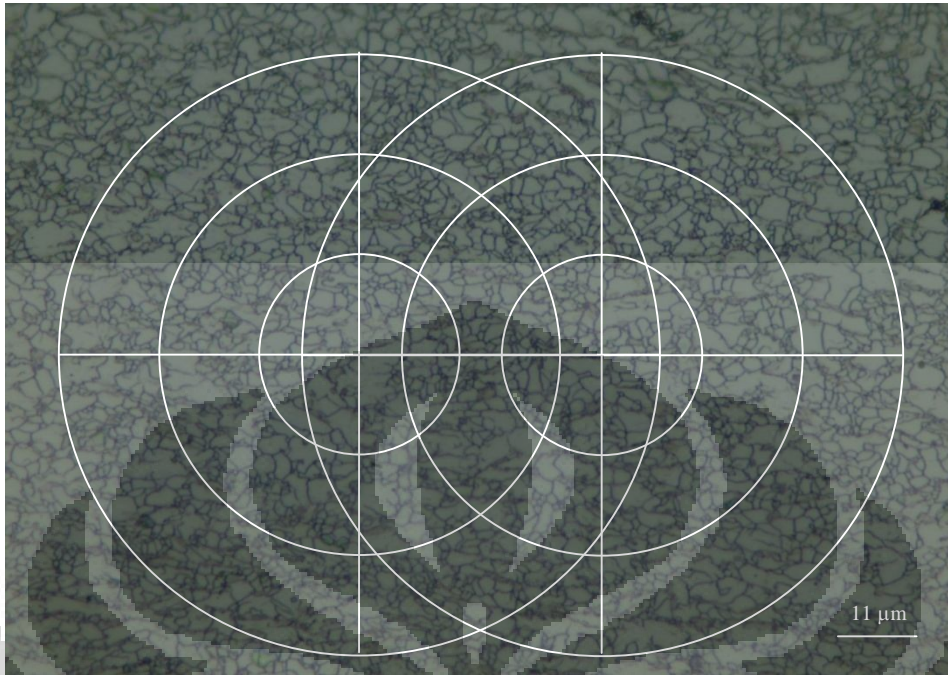
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $113 + 80 + 44 = 237$, lingkaran 2 = $118 + 77 + 40 = 235$

Rata-rata perpotongan = $(237 + 235)/2 = 236$ titik potong

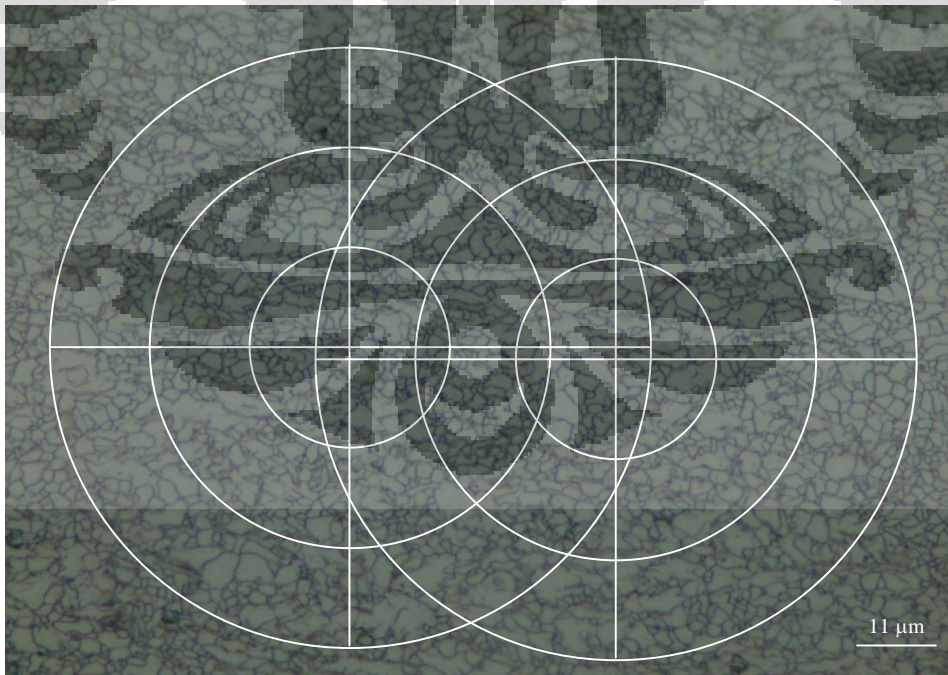
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $117 + 80 + 38 = 235$, lingkaran 2 = $114 + 74 + 44 = 232$

Rata-rata perpotongan = $(235 + 232)/2 = 233,5$ titik potong

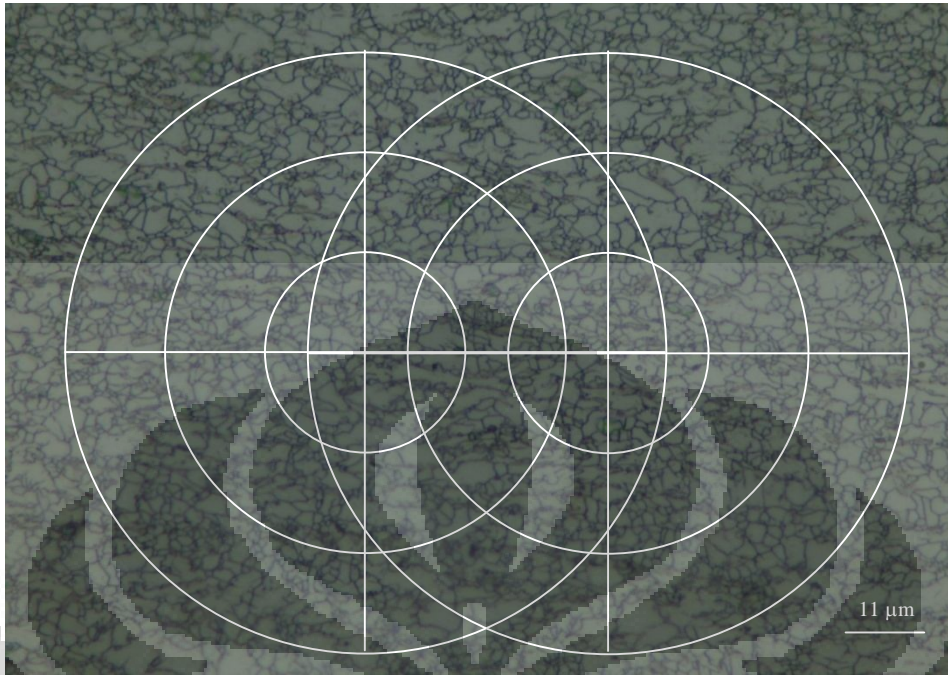
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $121 + 75 + 45 = 241$, lingkaran 2 = $114 + 79 + 44 = 237$

Rata-rata perpotongan = $(241 + 237)/2 = 239$ titik potong

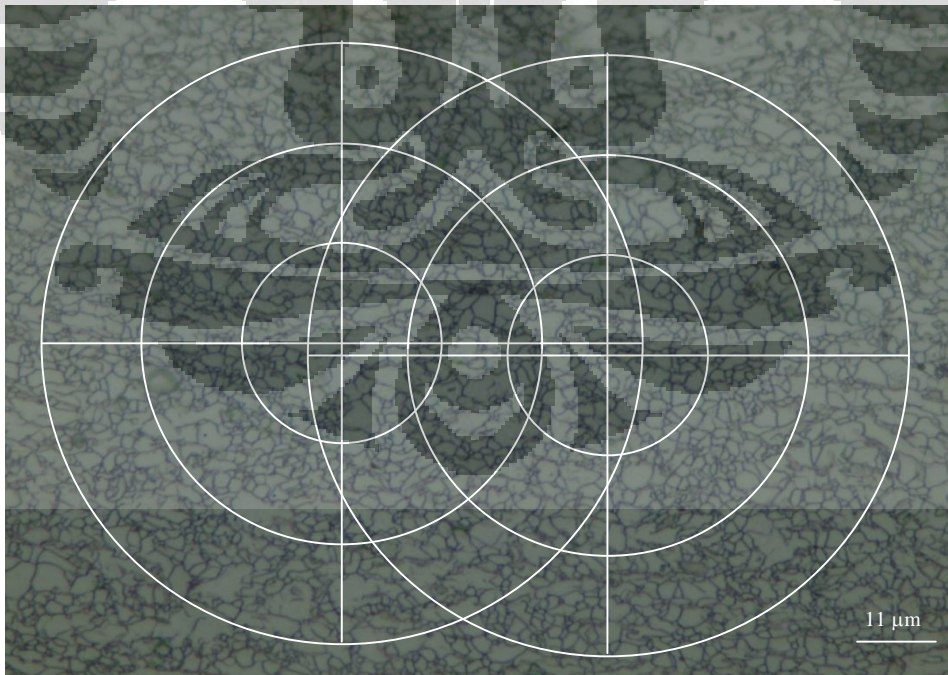
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $112 + 81 + 38 = 231$, lingkaran 2 = $111 + 78 + 44 = 233$

Rata-rata perpotongan = $(231 + 233)/2 = 232$ titik potong

8.

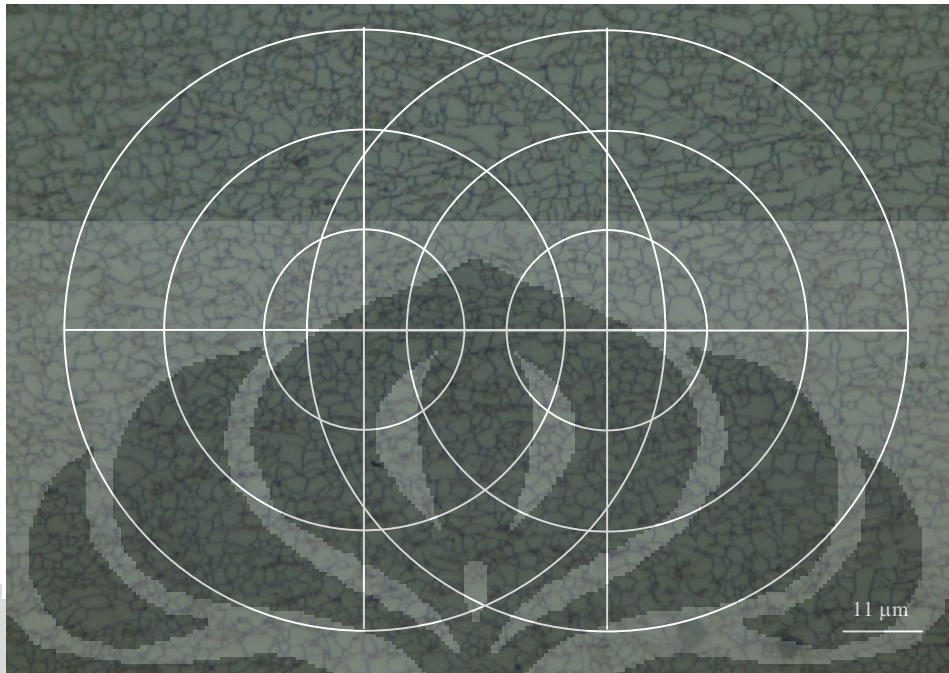


Perpotongan lingkaran 1 = $105 + 77 + 44 = 226$, lingkaran 2 = $111 + 78 + 47 = 236$

Rata-rata perpotongan = $(226 + 236)/2 = 231$ titik potong

Sampel 4 Titik 2 ($2,278 \pm 0,065 \mu\text{m}$)

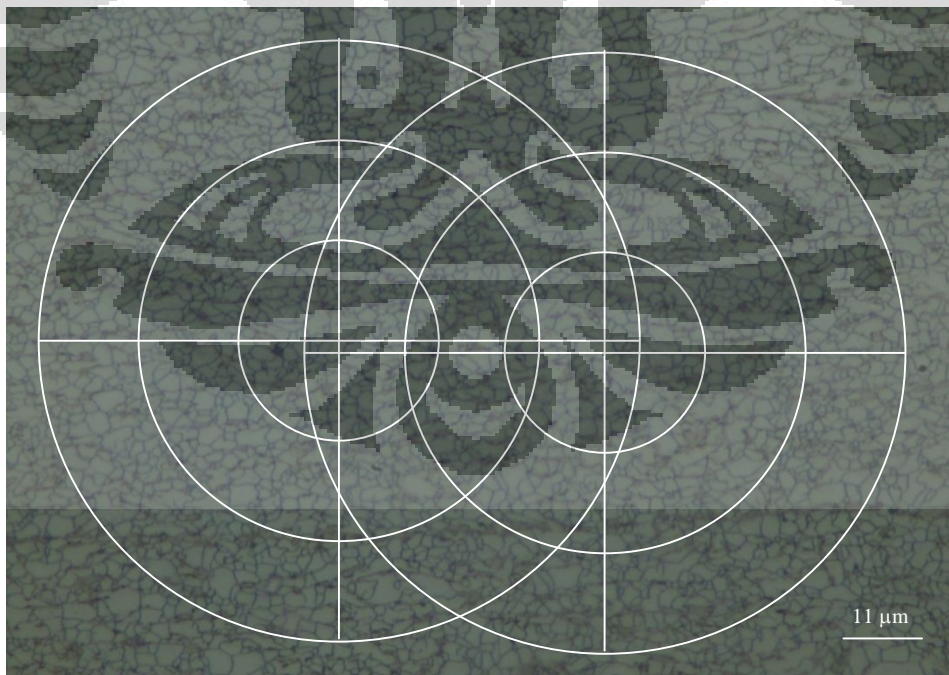
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $118 + 72 + 47 = 237$, lingkaran 2 = $123 + 78 + 43 = 244$

Rata-rata perpotongan = $(237 + 244)/2 = 240,5$ titik potong

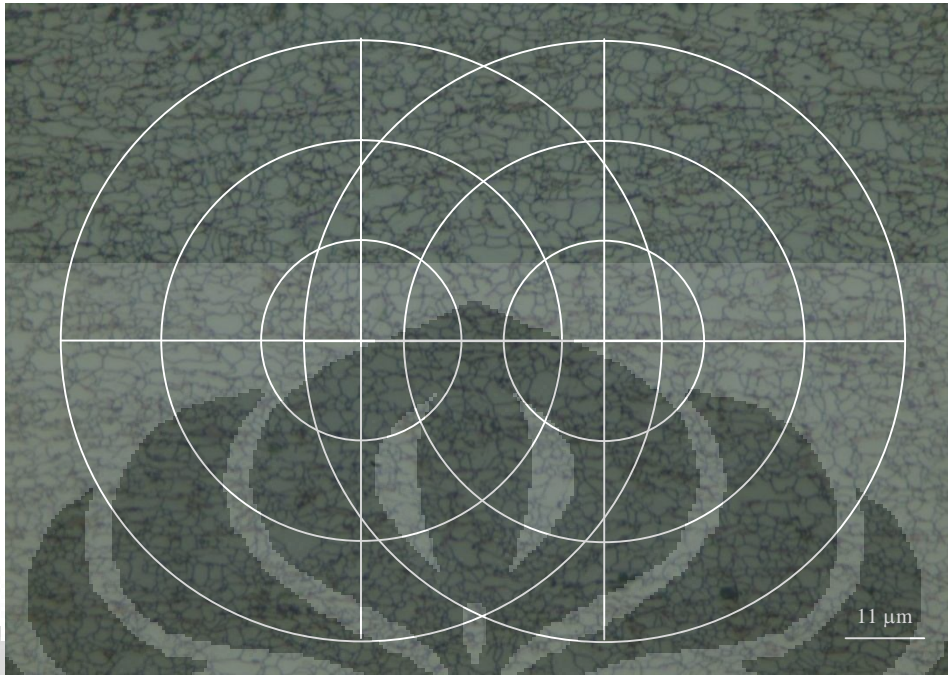
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $125 + 84 + 44 = 253$, lingkaran 2 = $113 + 81 + 39 = 233$

Rata-rata perpotongan = $(253 + 233)/2 = 243$ titik potong

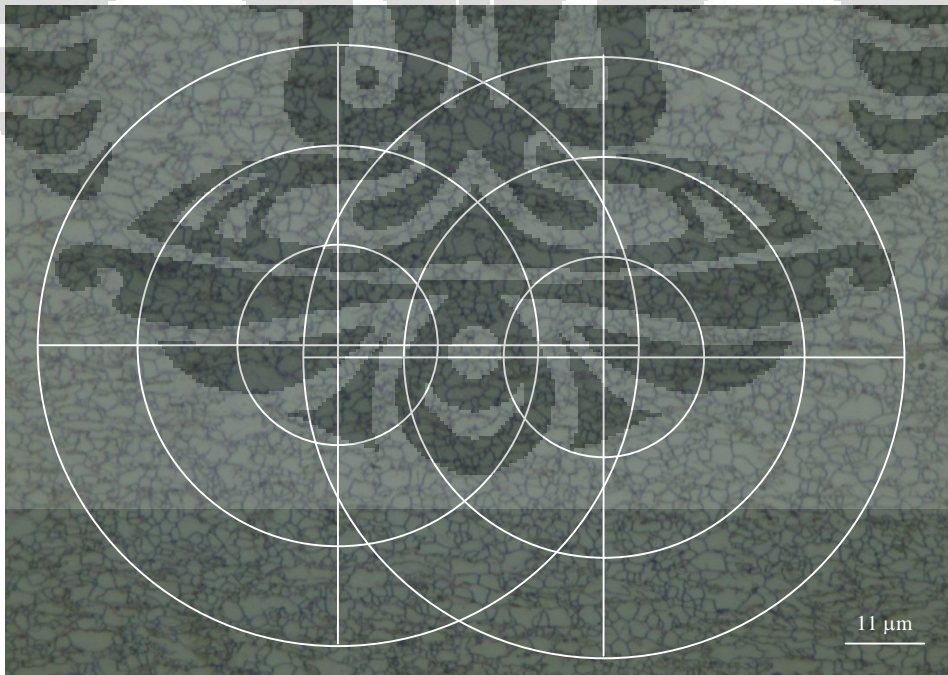
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $135 + 93 + 40 = 268$, lingkaran 2 = $131 + 88 + 42 = 261$

Rata-rata perpotongan = $(268 + 261)/2 = 264,5$ titik potong

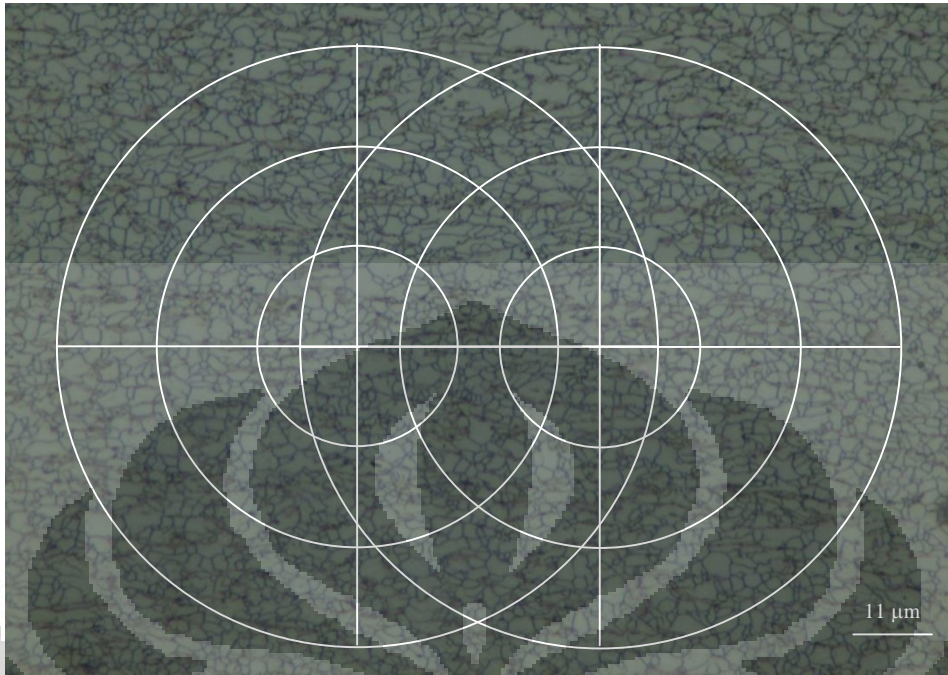
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $130 + 82 + 44 = 256$, lingkaran 2 = $128 + 87 + 43 = 257$

Rata-rata perpotongan = $(256 + 257)/2 = 256,5$ titik potong

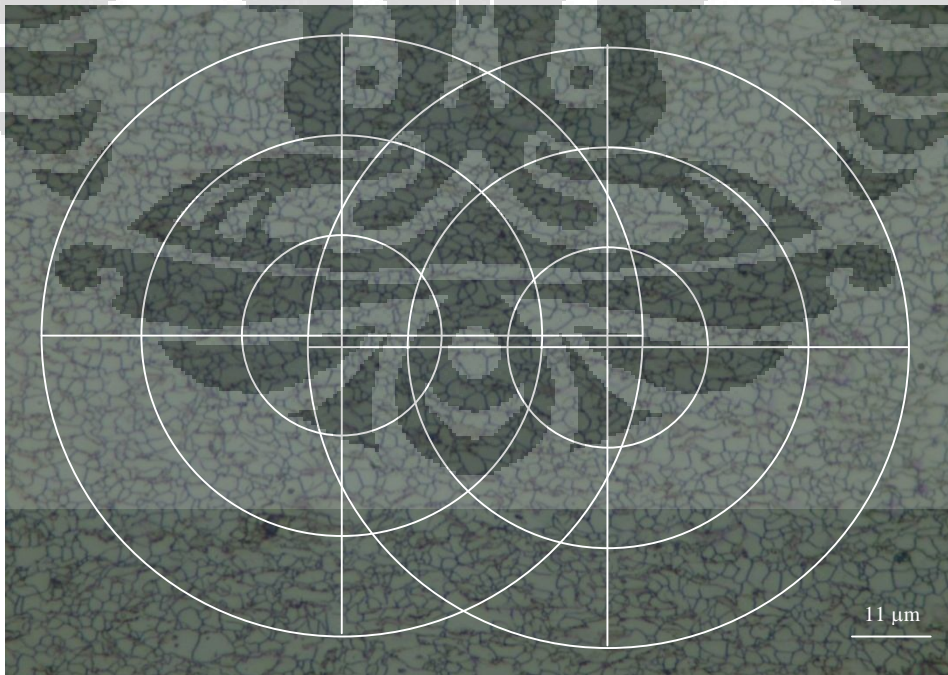
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $120 + 88 + 42 = 250$, lingkaran 2 = $122 + 86 + 44 = 252$

Rata-rata perpotongan = $(250 + 252)/2 = 251$ titik potong

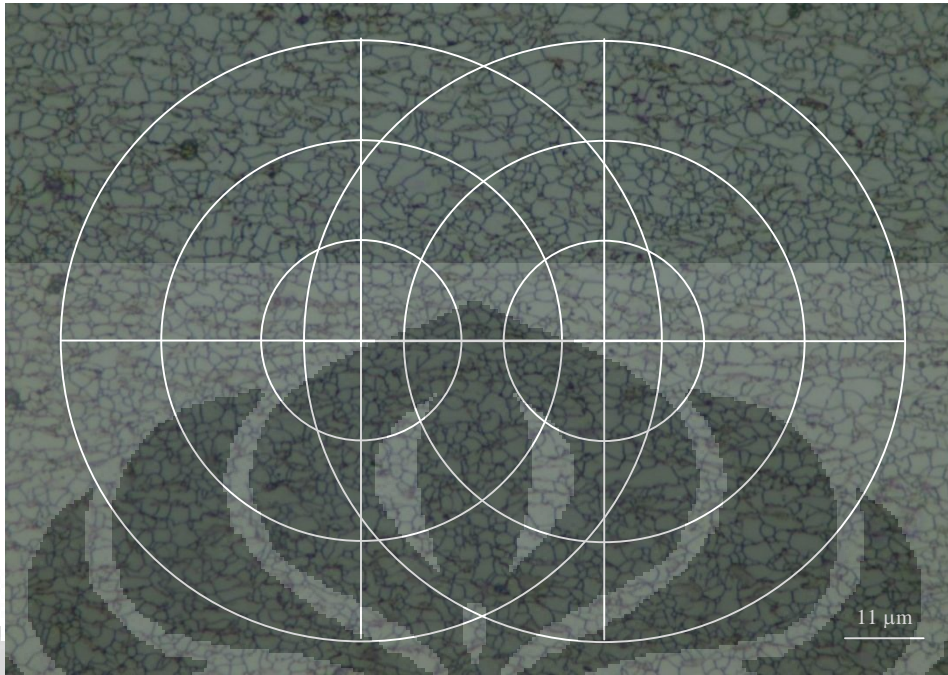
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $118 + 81 + 48 = 247$, lingkaran 2 = $123 + 84 + 39 = 246$

Rata-rata perpotongan = $(247 + 246)/2 = 246,5$ titik potong

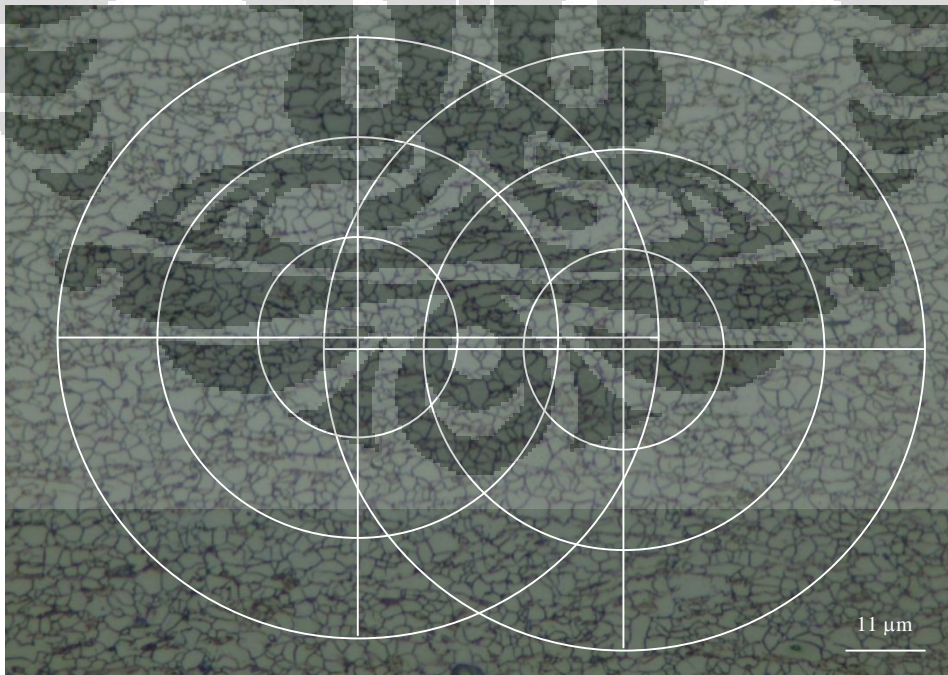
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $119 + 85 + 48 = 252$, lingkaran 2 = $121 + 80 + 45 = 246$

Rata-rata perpotongan = $(252 + 246)/2 = 249$ titik potong

8.

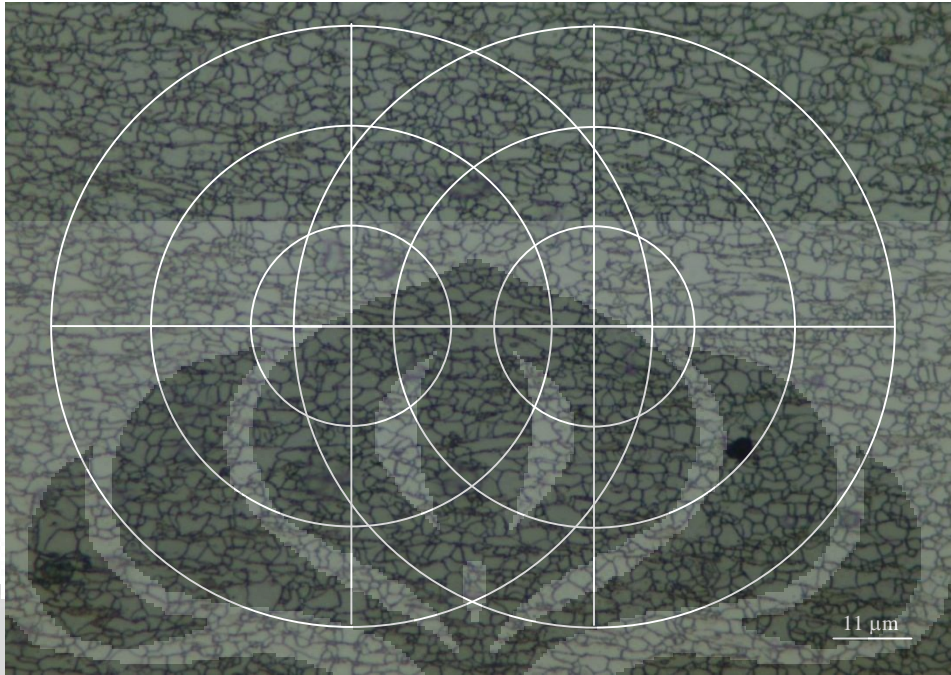


Perpotongan lingkaran 1 = $125 + 82 + 41 = 248$, lingkaran 2 = $124 + 84 + 41 = 249$

Rata-rata perpotongan = $(248 + 249)/2 = 248,5$ titik potong

Sampel 4 Titik 3 ($2,180 \pm 0,116 \mu\text{m}$)

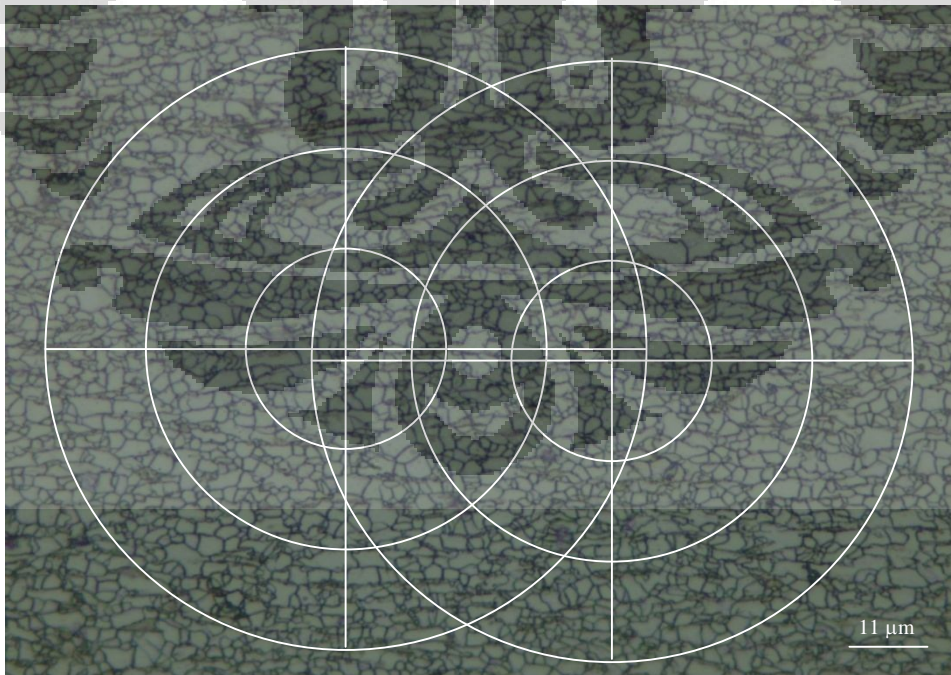
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $123 + 78 + 43 = 244$, lingkaran 2 = $117 + 84 + 42 = 243$

Rata-rata perpotongan = $(244 + 243)/2 = 243,5$ titik potong

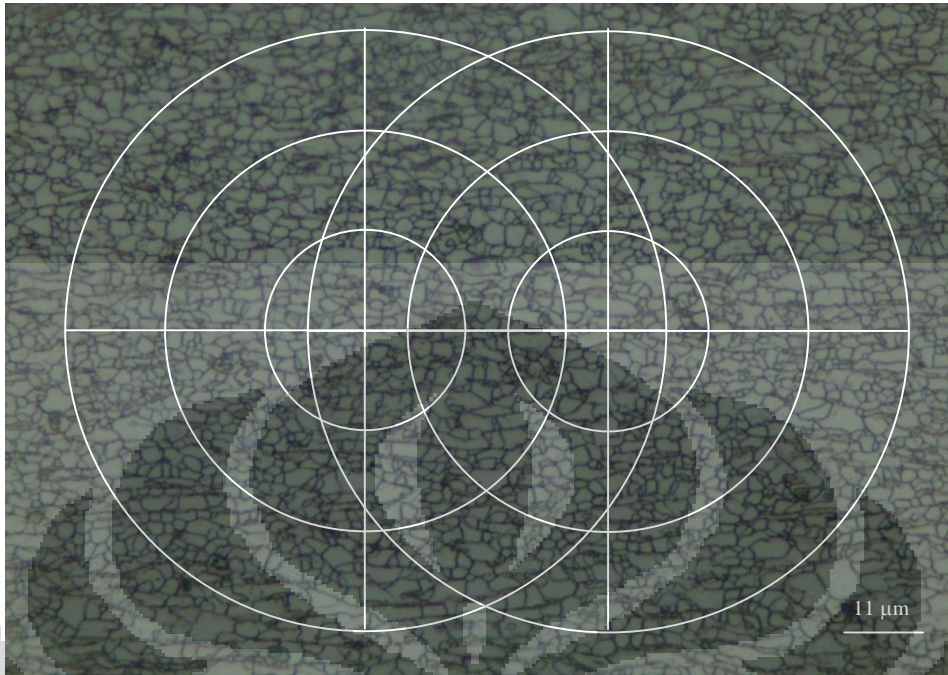
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $121 + 73 + 40 = 234$, lingkaran 2 = $120 + 83 + 46 = 249$

Rata-rata perpotongan = $(234 + 249)/2 = 241,5$ titik potong

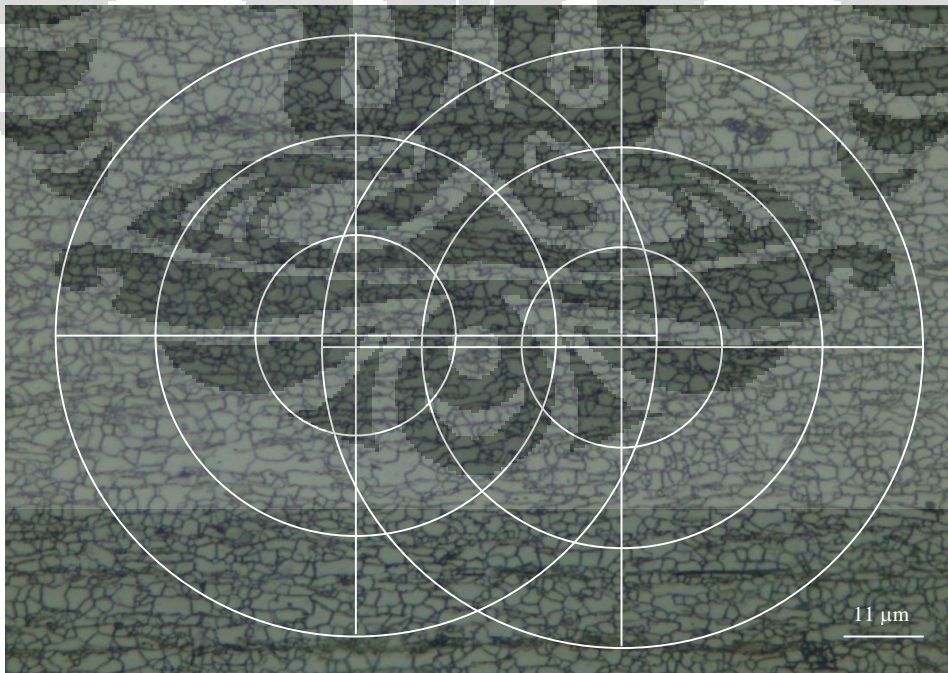
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $125 + 88 + 49 = 262$, lingkaran 2 = $118 + 85 + 44 = 247$

Rata-rata perpotongan = $(262 + 247)/2 = 254,5$ titik potong

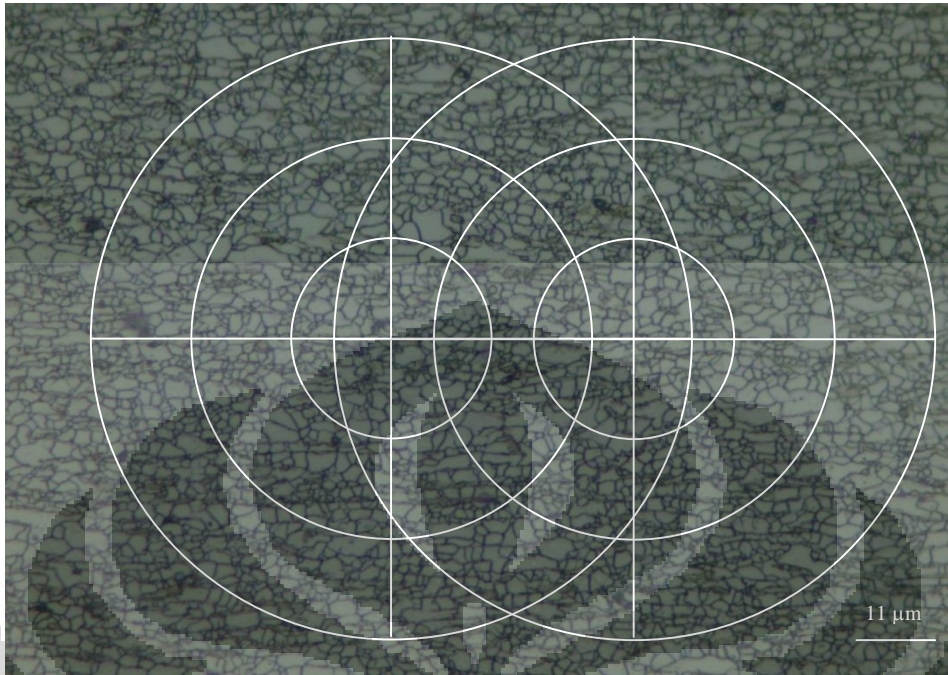
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $137 + 90 + 52 = 279$, lingkaran 2 = $130 + 86 + 47 = 263$

Rata-rata perpotongan = $(279 + 263)/2 = 271$ titik potong

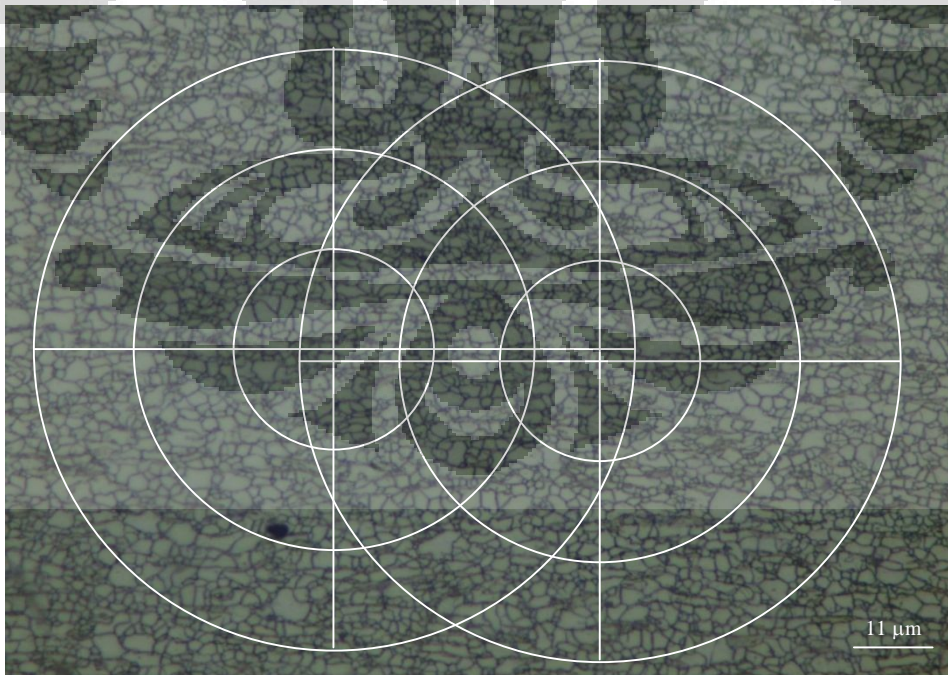
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $143 + 91 + 44 = 278$, lingkaran 2 = $141 + 96 + 48 = 285$

Rata-rata perpotongan = $(278 + 285)/2 = 281,5$ titik potong

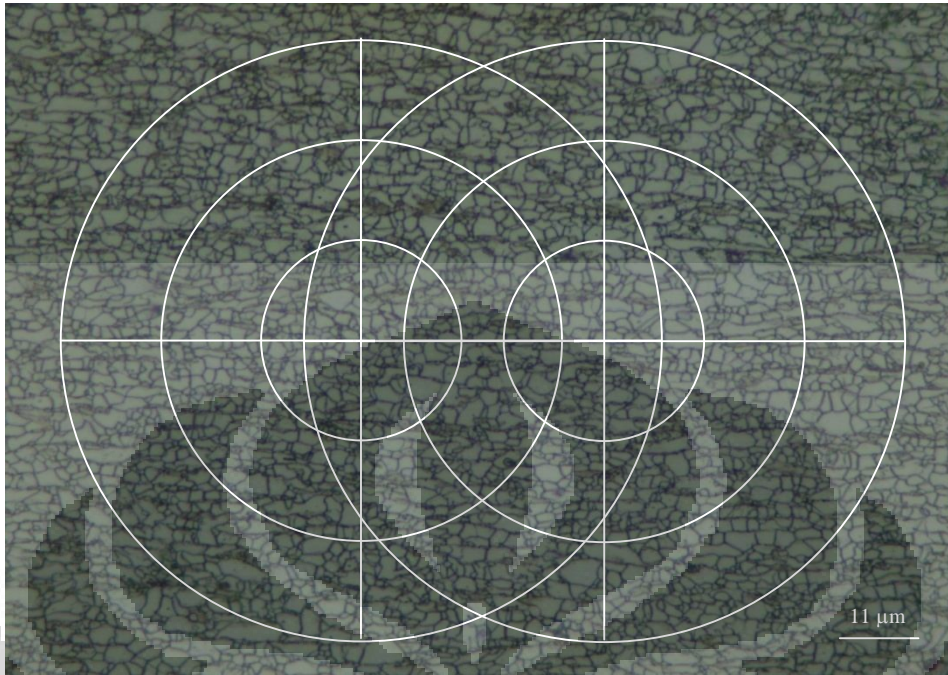
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $148 + 89 + 47 = 284$, lingkaran 2 = $131 + 90 + 46 = 267$

Rata-rata perpotongan = $(284 + 267)/2 = 275,5$ titik potong

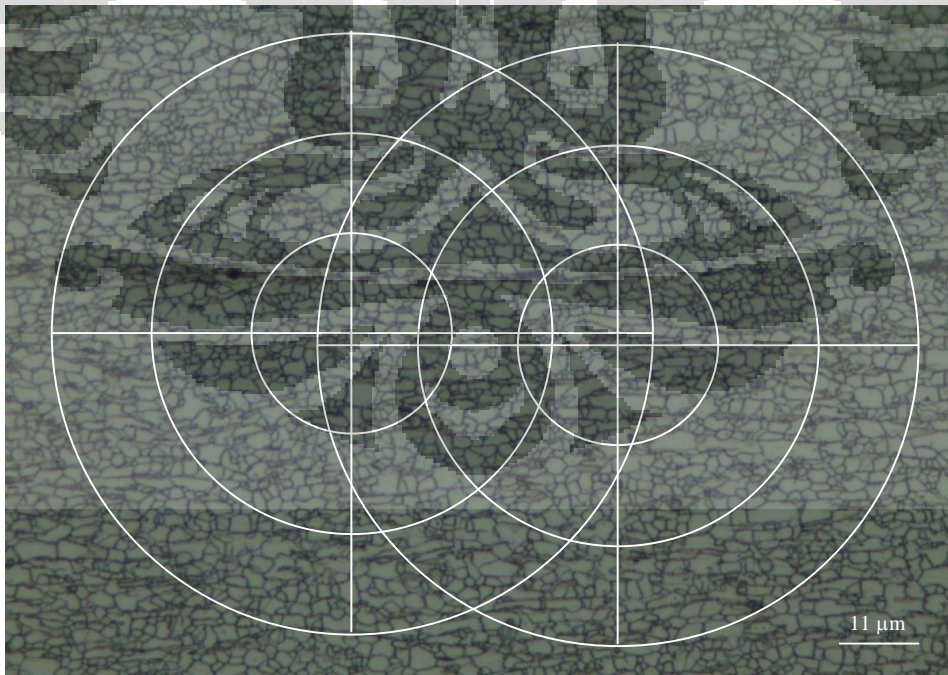
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $129 + 88 + 48 = 265$, lingkaran 2 = $135 + 90 + 45 = 270$

Rata-rata perpotongan = $(265 + 270)/2 = 267,5$ titik potong

8.

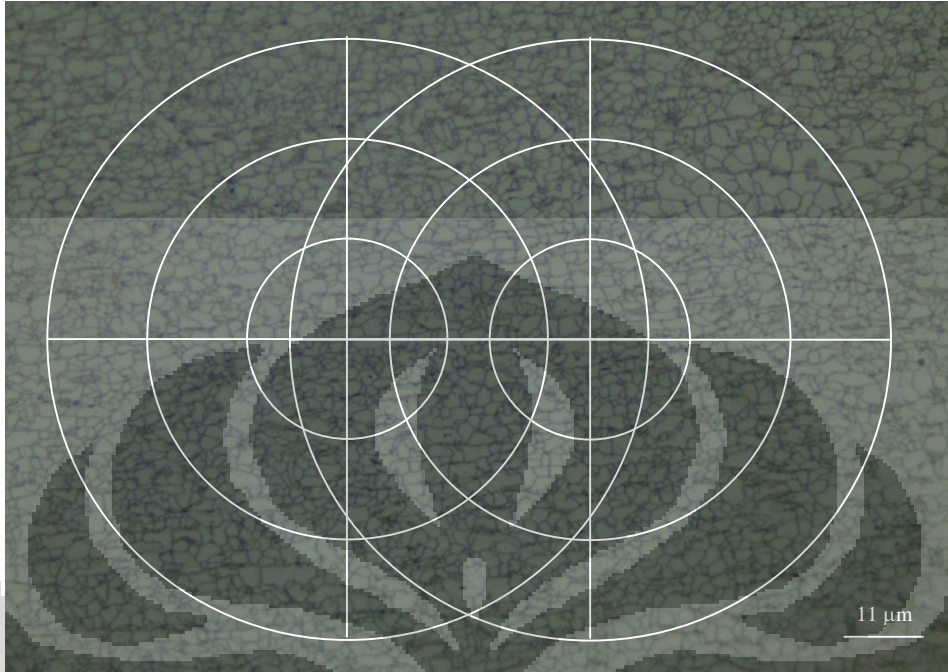


Perpotongan lingkaran 1 = $135 + 84 + 48 = 267$, lingkaran 2 = $133 + 82 + 46 = 261$

Rata-rata perpotongan = $(267 + 261)/2 = 264$ titik potong

Sampel 4 Titik 4 ($1,905 \pm 0,061 \mu\text{m}$)

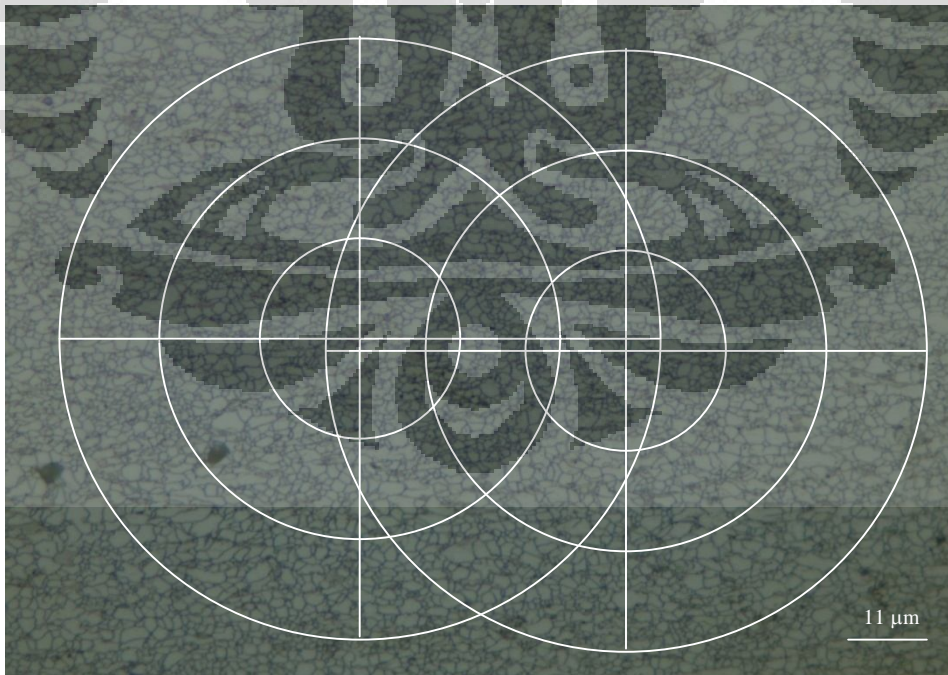
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $141 + 97 + 49 = 287$, lingkaran 2 = $130 + 91 + 50 = 271$

Rata-rata perpotongan = $(287 + 271)/2 = 279$ titik potong

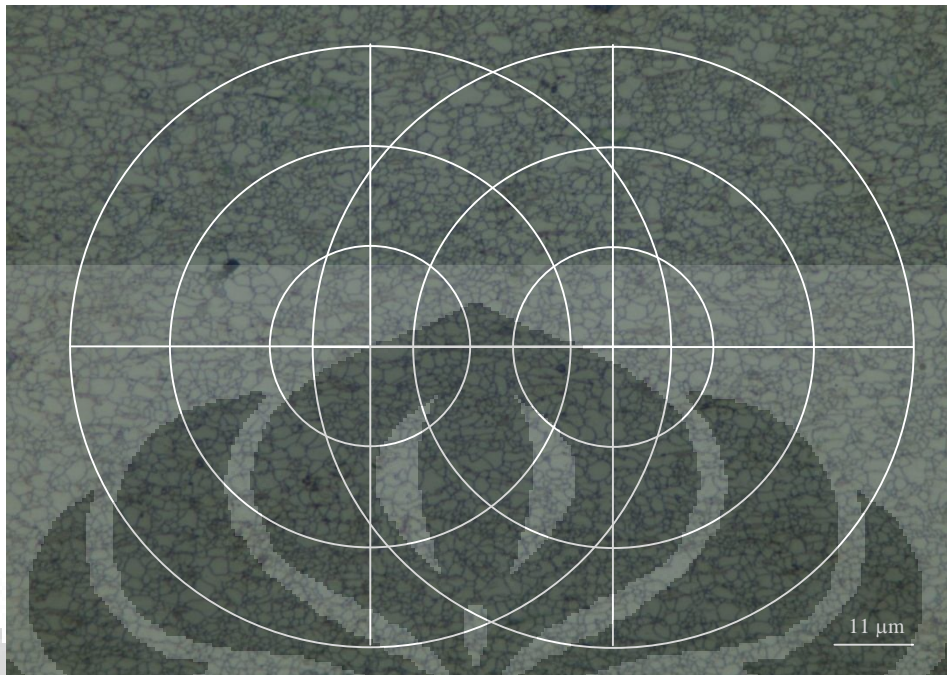
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $148 + 102 + 52 = 302$, lingkaran 2 = $152 + 100 + 54 = 306$

Rata-rata perpotongan = $(302 + 306)/2 = 304$ titik potong

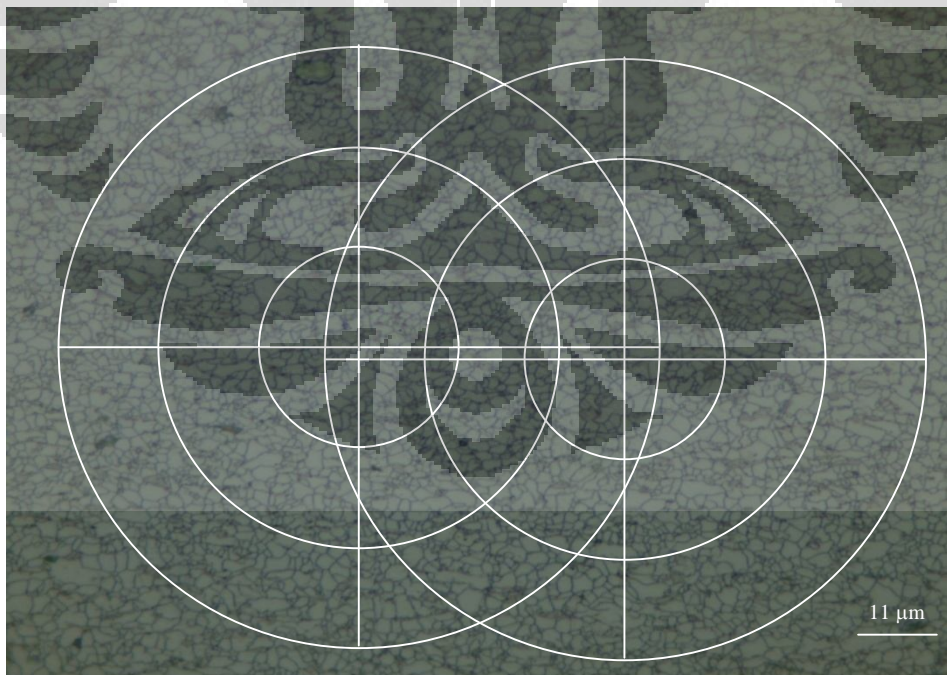
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $146 + 101 + 57 = 304$, lingkaran 2 = $149 + 109 + 52 = 310$

Rata-rata perpotongan = $(304 + 310)/2 = 307$ titik potong

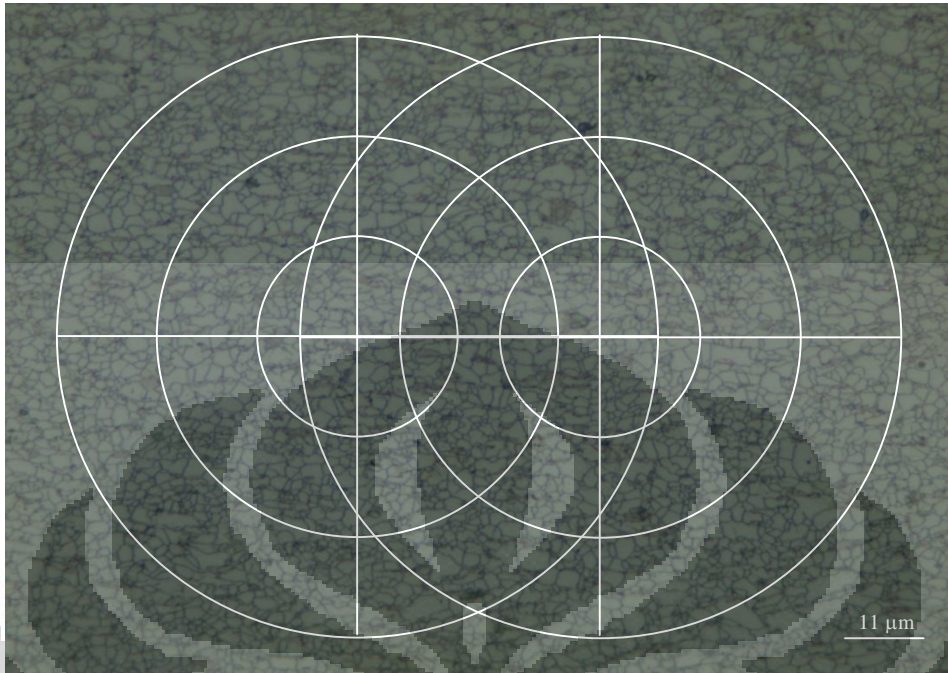
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $145 + 106 + 49 = 300$, lingkaran 2 = $144 + 106 + 55 = 305$

Rata-rata perpotongan = $(300 + 305)/2 = 302,5$ titik potong

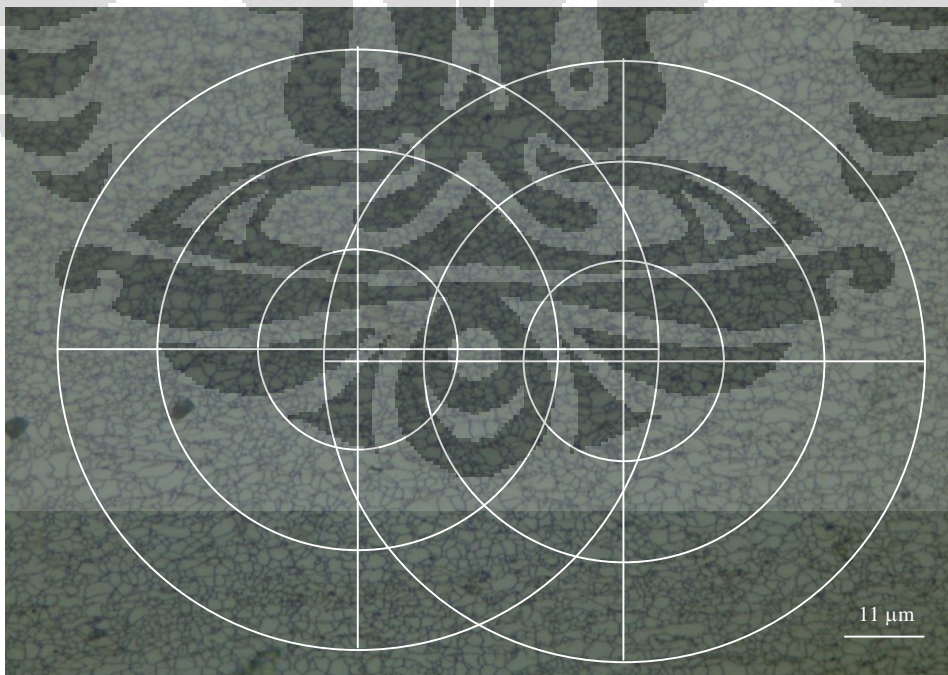
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $152 + 98 + 56 = 306$, lingkaran 2 = $145 + 99 + 47 = 311$

Rata-rata perpotongan = $(306 + 311)/2 = 308,5$ titik potong

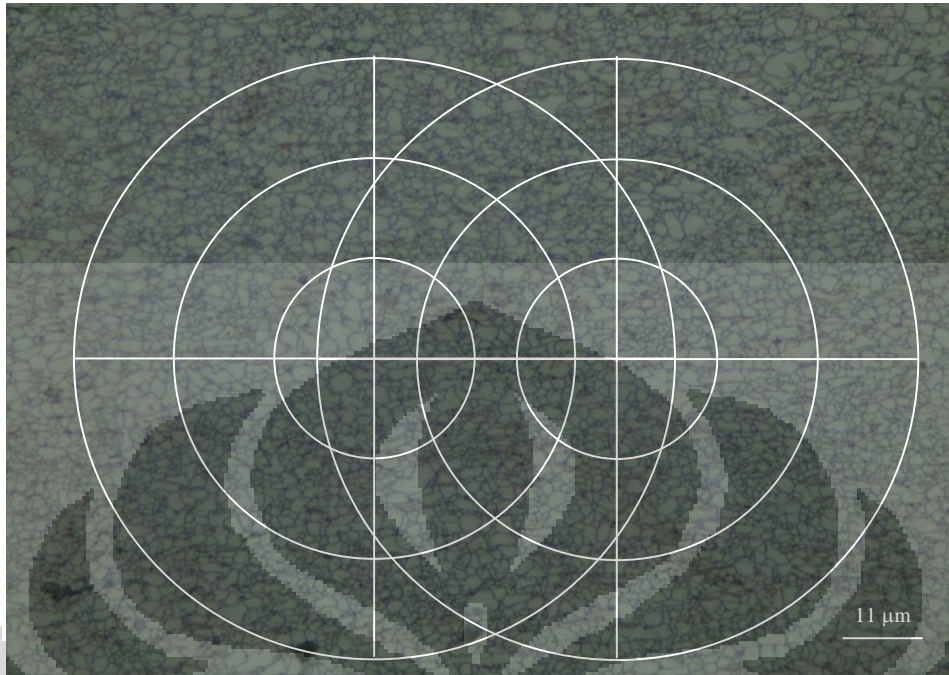
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $156 + 102 + 48 = 306$, lingkaran 2 = $146 + 110 + 56 = 312$

Rata-rata perpotongan = $(306 + 312)/2 = 309$ titik potong

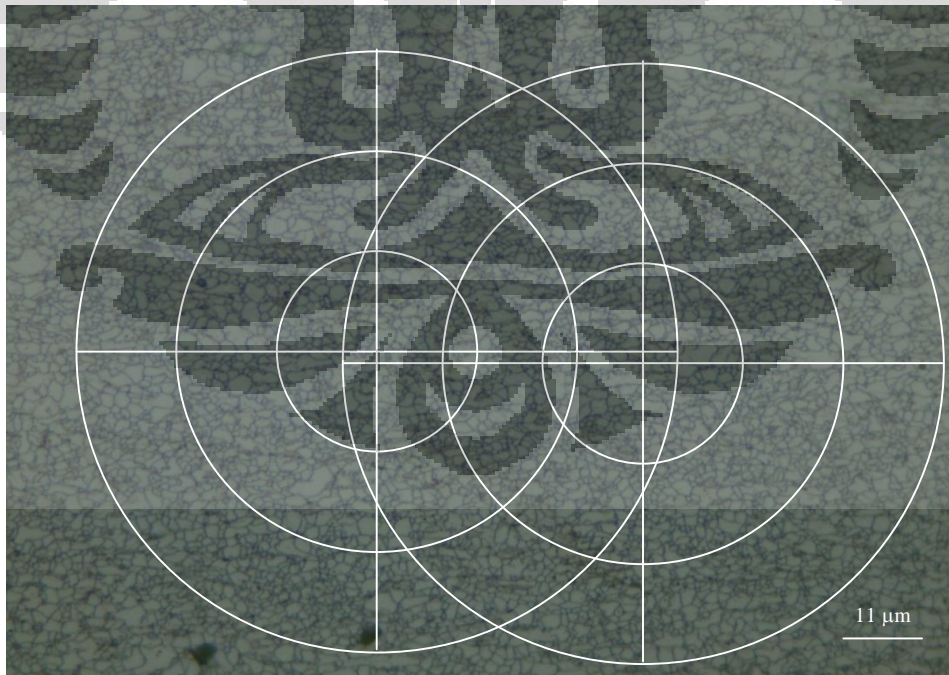
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $142 + 109 + 48 = 299$, lingkaran 2 = $147 + 110 + 58 = 315$

Rata-rata perpotongan = $(299 + 315)/2 = 307$ titik potong

8.

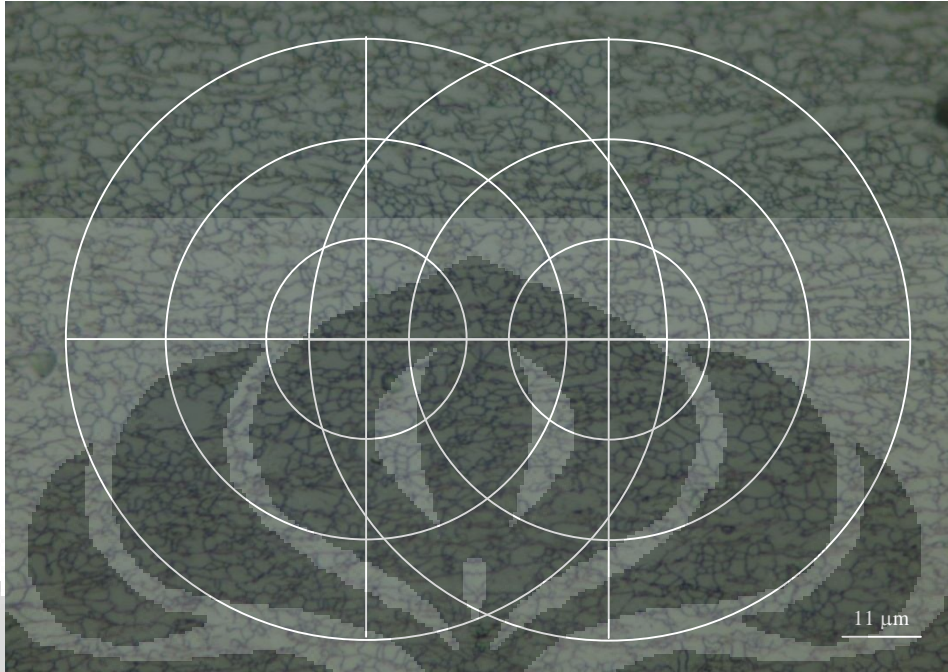


Perpotongan lingkaran 1 = $150 + 104 + 51 = 305$, lingkaran 2 = $147 + 106 + 53 = 306$

Rata-rata perpotongan = $(305 + 306)/2 = 305,5$ titik potong

Sampel 5 Titik 1 ($2,465 \pm 0,044 \mu\text{m}$)

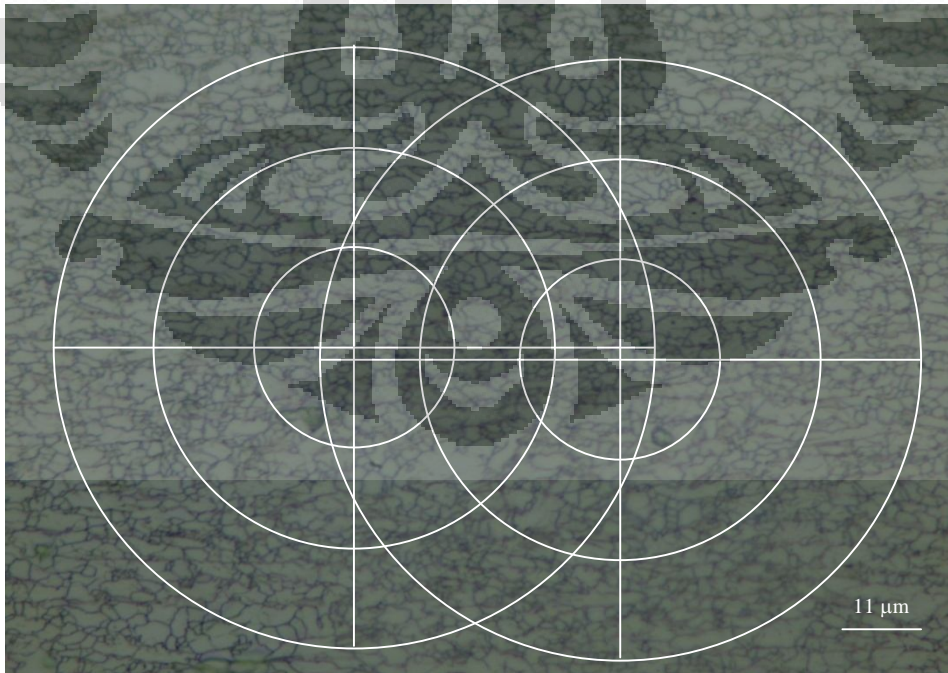
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $116+72+39=227$, lingkaran 2 = $115+74+34=223$

Rata-rata perpotongan = $(227+223)/2 = 225$ titik potong

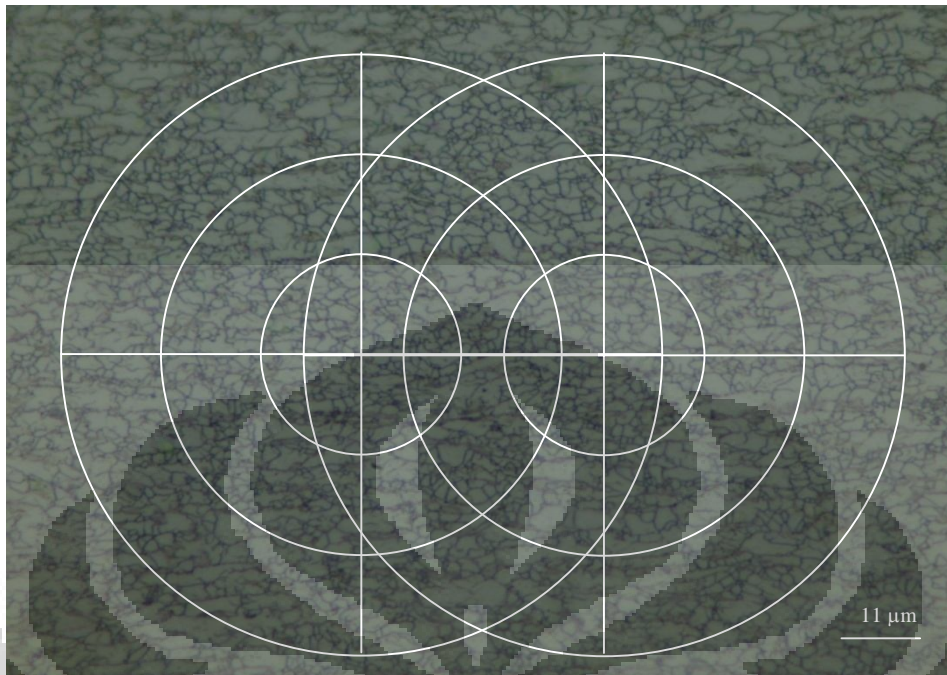
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $123+82+36=241$, lingkaran 2 = $119+71+41=231$

Rata-rata perpotongan = $(241+231)/2 = 236$ titik potong

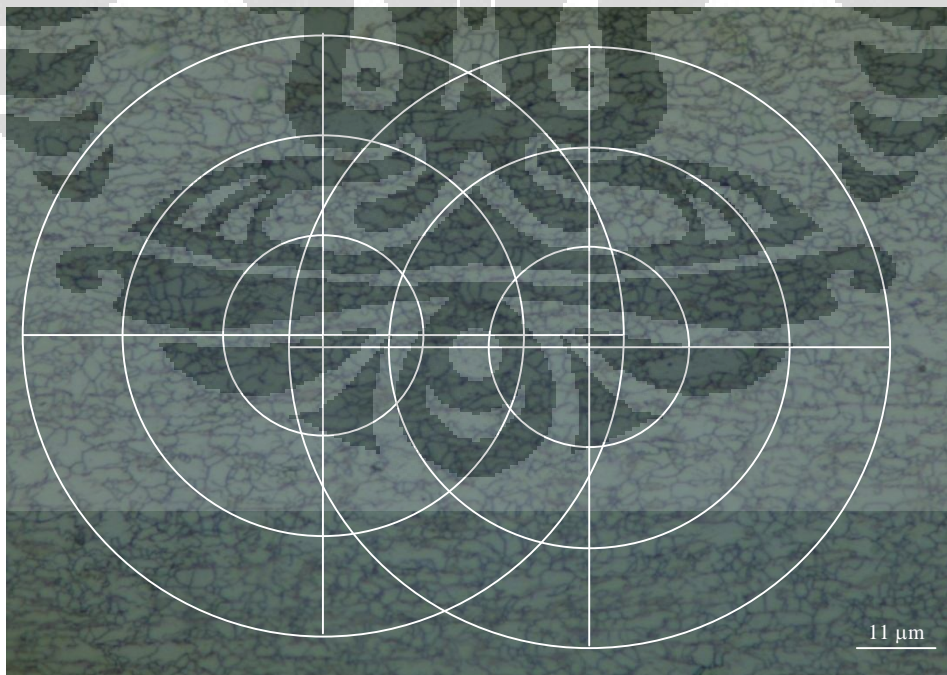
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $121+80+37=238$, lingkaran 2 = $112+74+38=224$

Rata-rata perpotongan = $(238+224)/2 = 231$ titik potong

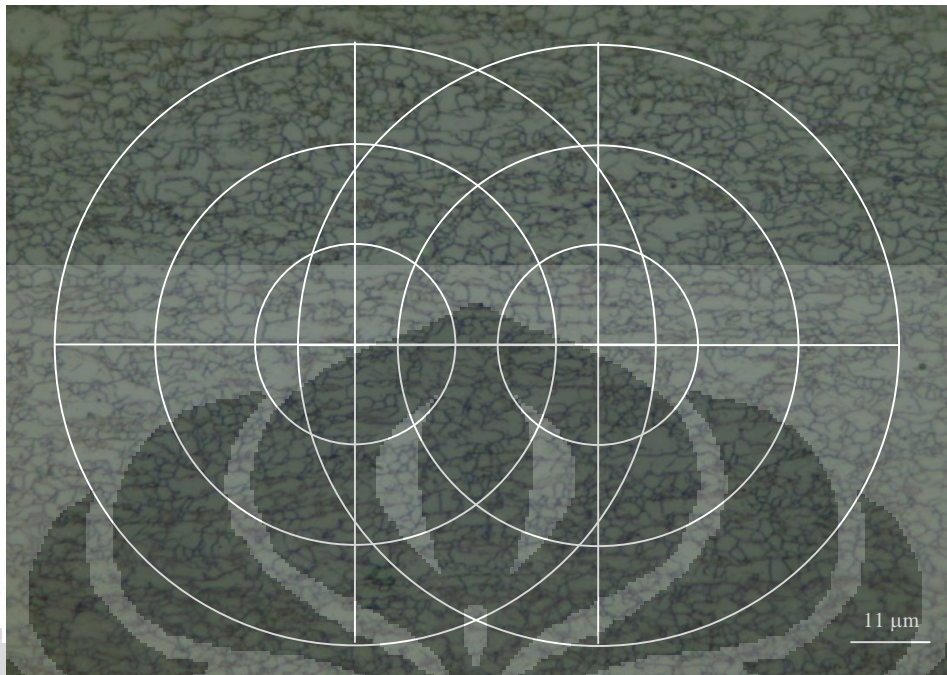
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $124+72+38=234$, lingkaran 2 = $118+80+30=228$

Rata-rata perpotongan = $(234+228)/2 = 231$ titik potong

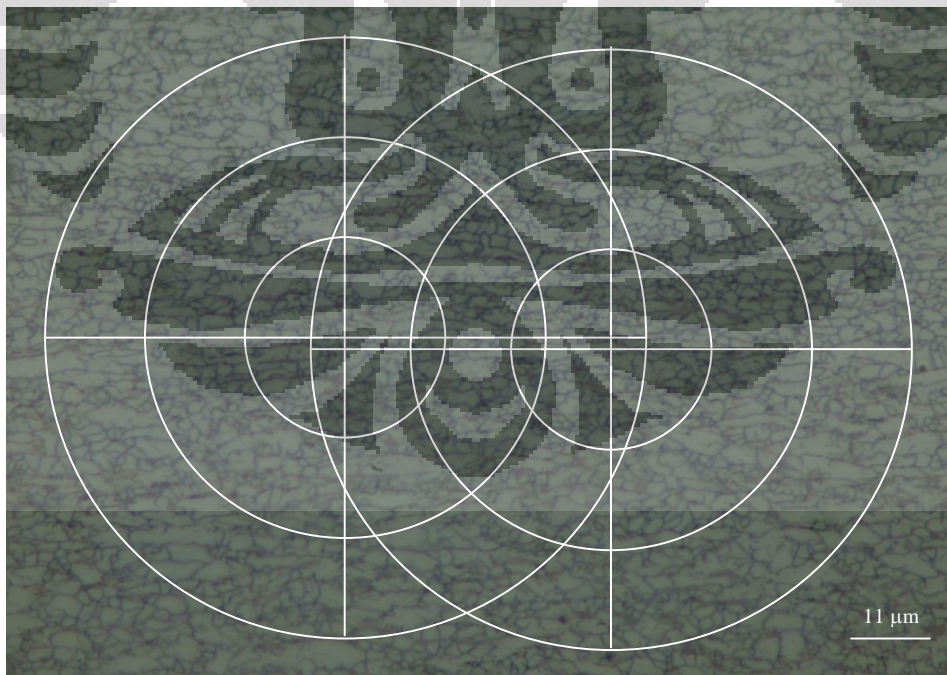
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $115+74+34=223$, lingkaran 2 = $111+70+38=119$

Rata-rata perpotongan = $(223+119)/2 = 221$ titik potong

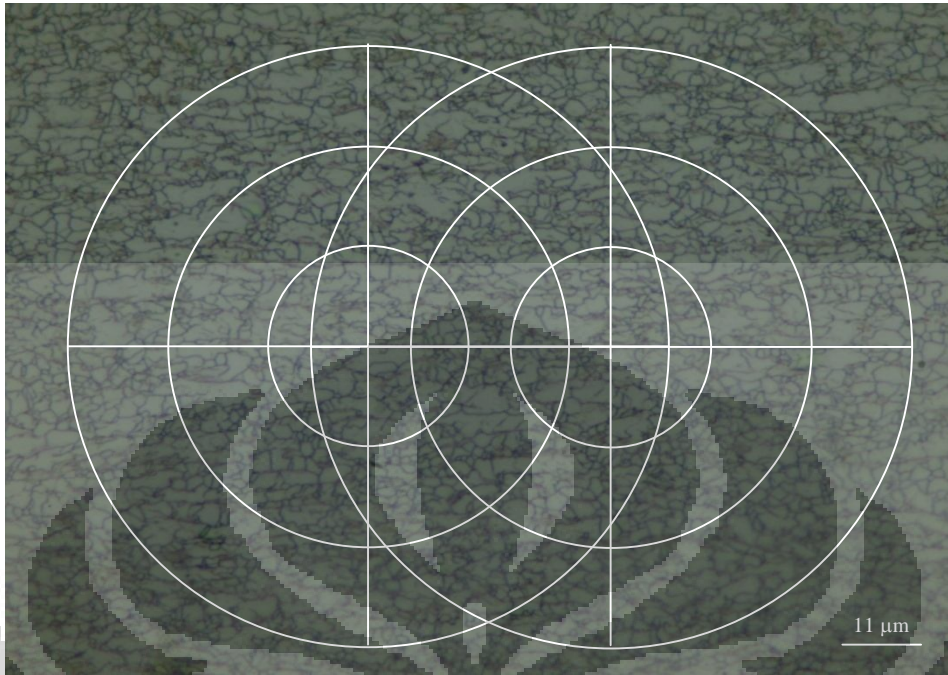
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $115+73+37=225$, lingkaran 2 = $110+80+39=229$

Rata-rata perpotongan = $(225+229)/2 = 227$ titik potong

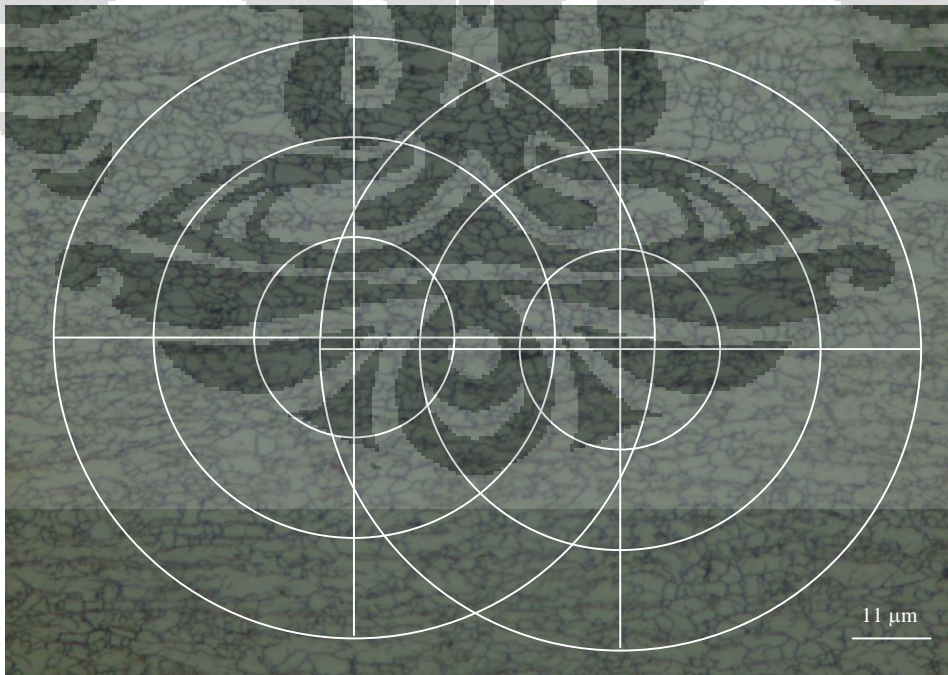
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $116+71+32=219$, lingkaran 2 = $107+70+34=211$

Rata-rata perpotongan = $(219+211)/2 = 215$ titik potong

8.

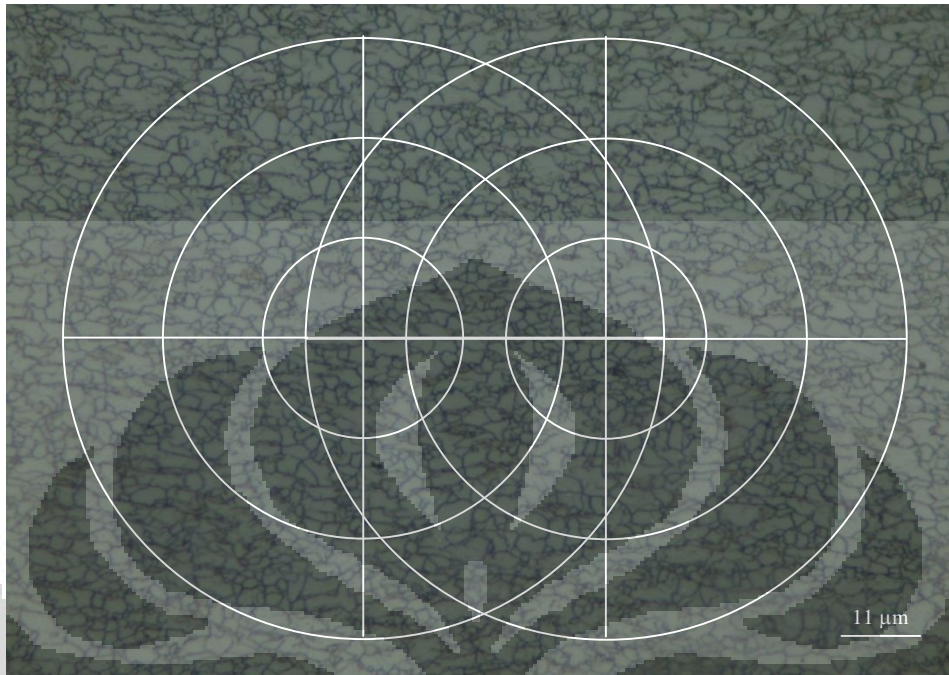


Perpotongan lingkaran 1 = $107+74+35=216$, lingkaran 2 = $108+68+36=212$

Rata-rata perpotongan = $(216+212)/2 = 214$ titik potong

Sampel 5 Titik 2 ($2,196 \pm 0,091 \mu\text{m}$)

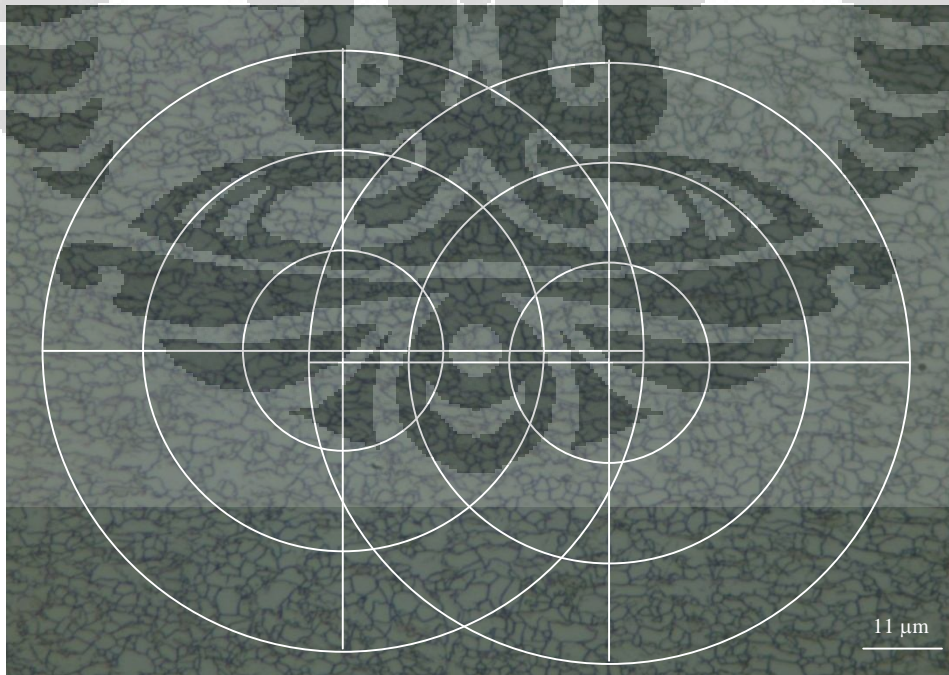
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $110 + 79 + 38 = 227$, lingkaran 2 = $126 + 85 + 46 = 257$

Rata-rata perpotongan = $(227 + 257)/2 = 242$ titik potong

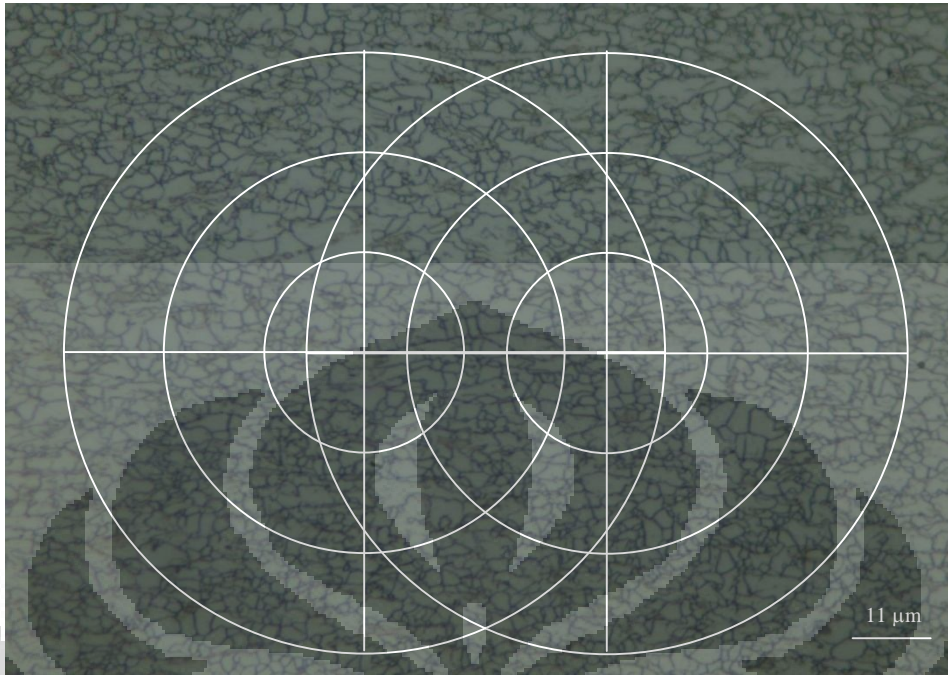
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $121 + 73 + 44 = 238$, lingkaran 2 = $127 + 76 + 35 = 238$

Rata-rata perpotongan = $(238 + 238)/2 = 238$ titik potong

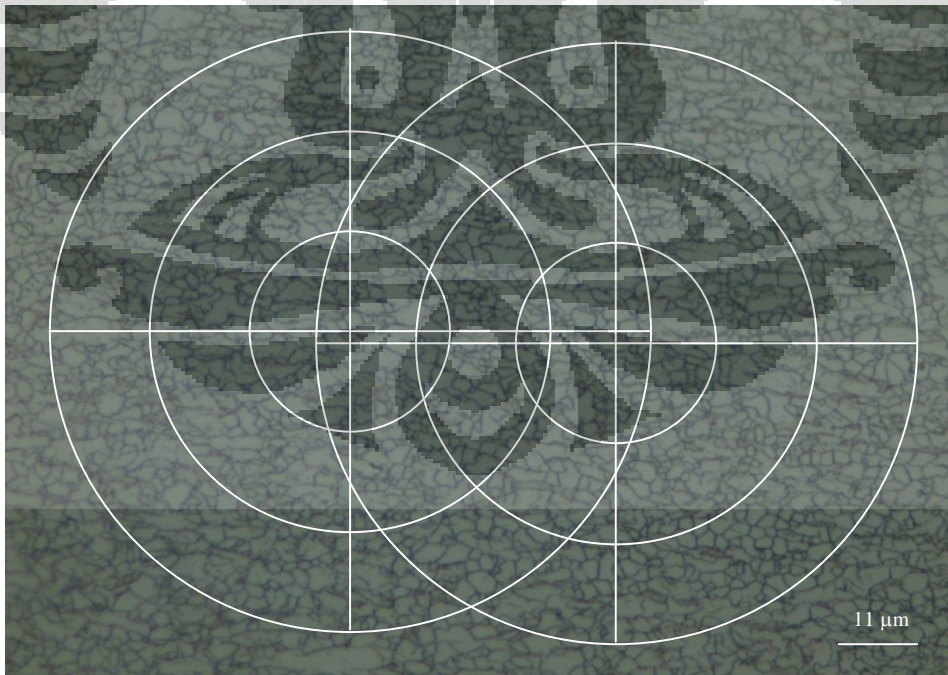
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $116 + 80 + 41 = 237$, lingkaran 2 = $121 + 89 + 41 = 251$

Rata-rata perpotongan = $(237 + 251)/2 = 244$ titik potong

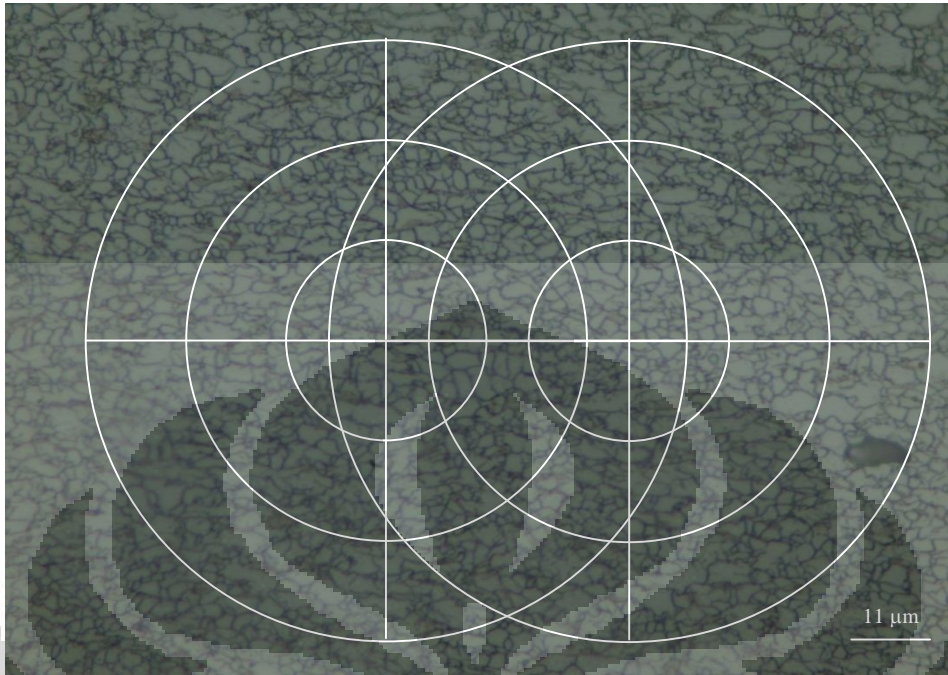
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $129 + 83 + 43 = 255$, lingkaran 2 = $126 + 92 + 42 = 260$

Rata-rata perpotongan = $(255 + 260)/2 = 257,5$ titik potong

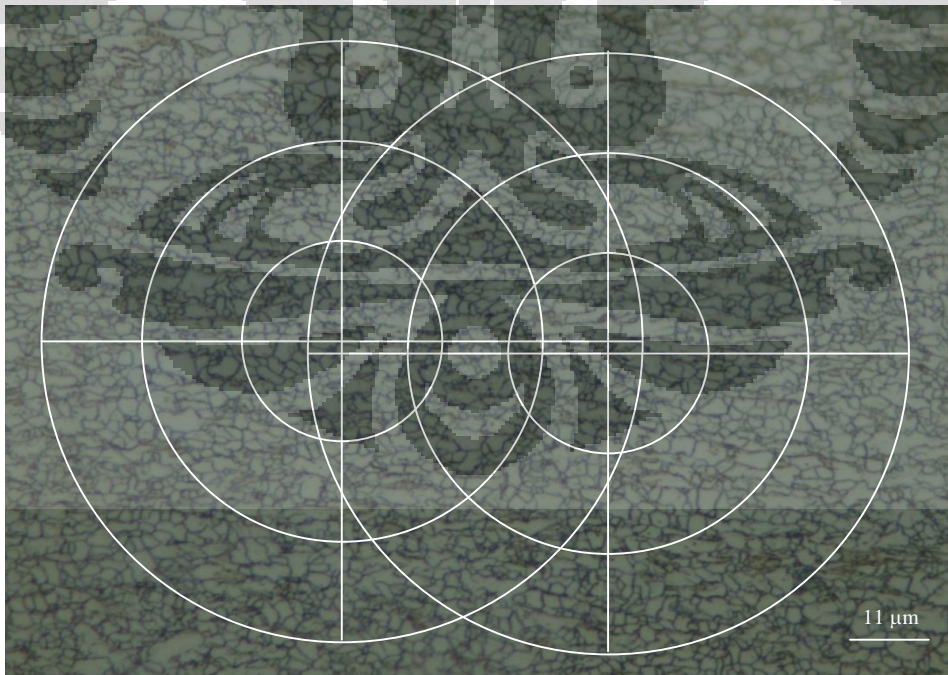
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $130 + 86 + 40 = 256$, lingkaran 2 = $135 + 87 + 42 = 264$

Rata-rata perpotongan = $(256 + 264)/2 = 260$ titik potong

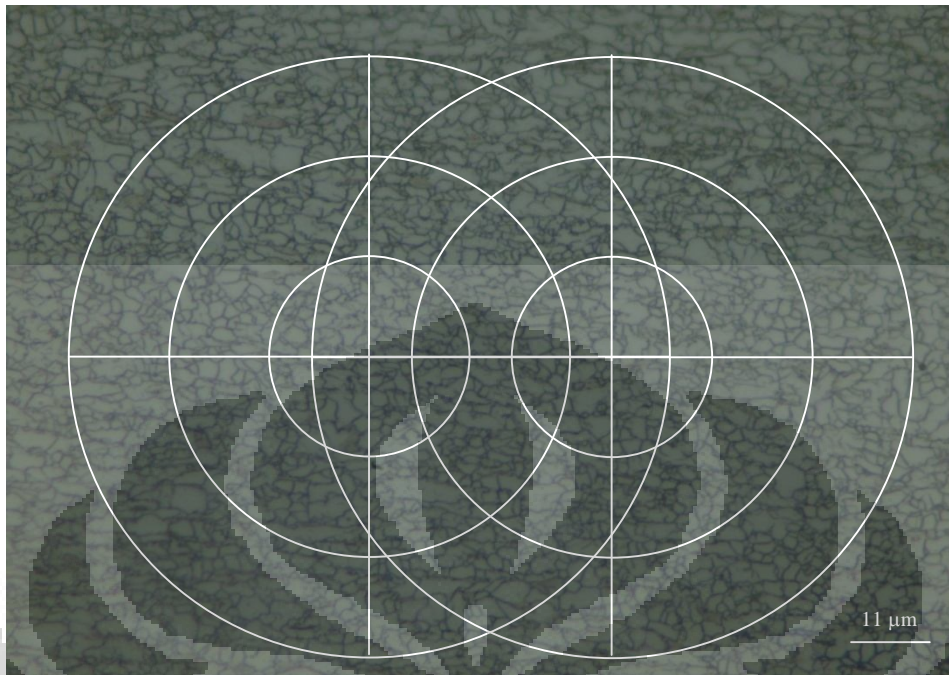
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $124 + 107 + 46 = 277$, lingkaran 2 = $138 + 92 + 45 = 275$

Rata-rata perpotongan = $(277 + 275)/2 = 276$ titik potong

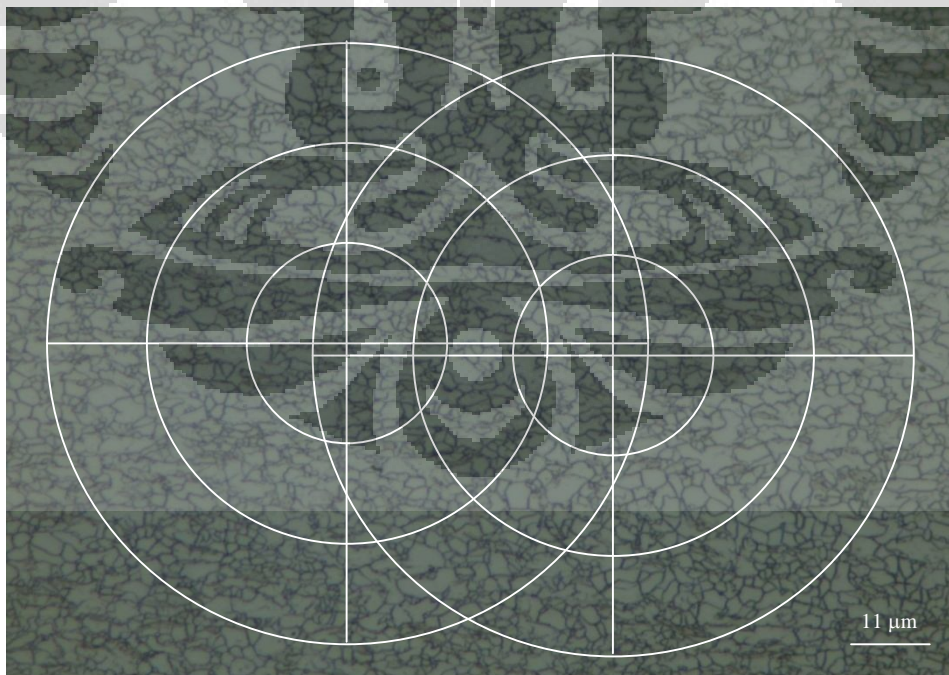
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $131 + 80 + 36 = 247$, lingkaran 2 = $119 + 80 + 40 = 239$

Rata-rata perpotongan = $(247 + 239)/2 = 243$ titik potong

8.

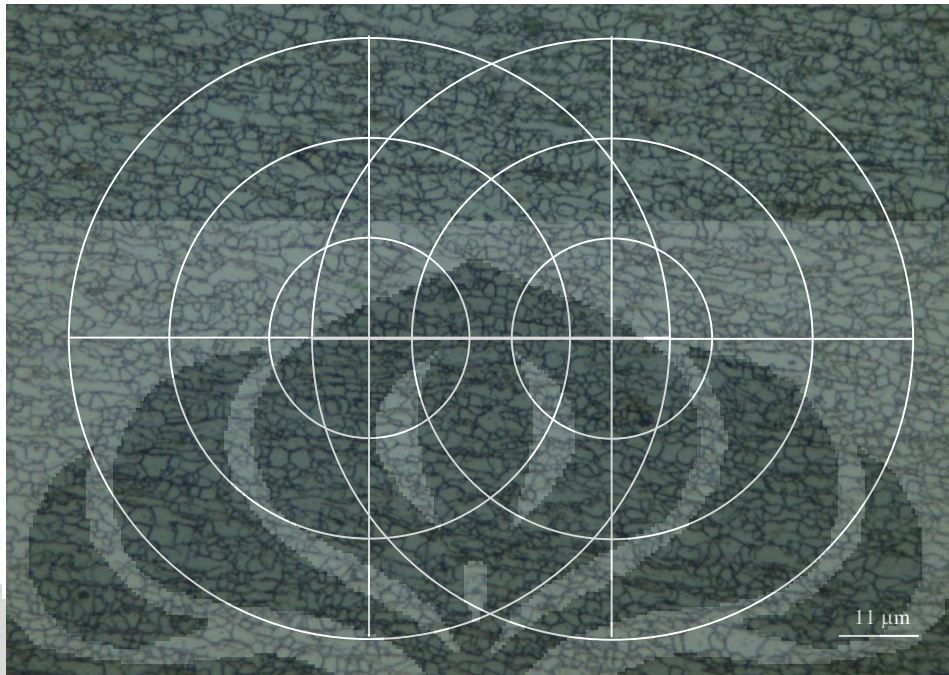


Perpotongan lingkaran 1 = $130 + 87 + 46 = 263$, lingkaran 2 = $134 + 86 + 42 = 262$

Rata-rata perpotongan = $(263 + 262)/2 = 262,5$ titik potong

Sampel 5 Titik 3 ($2,079 \pm 0,104 \mu\text{m}$)

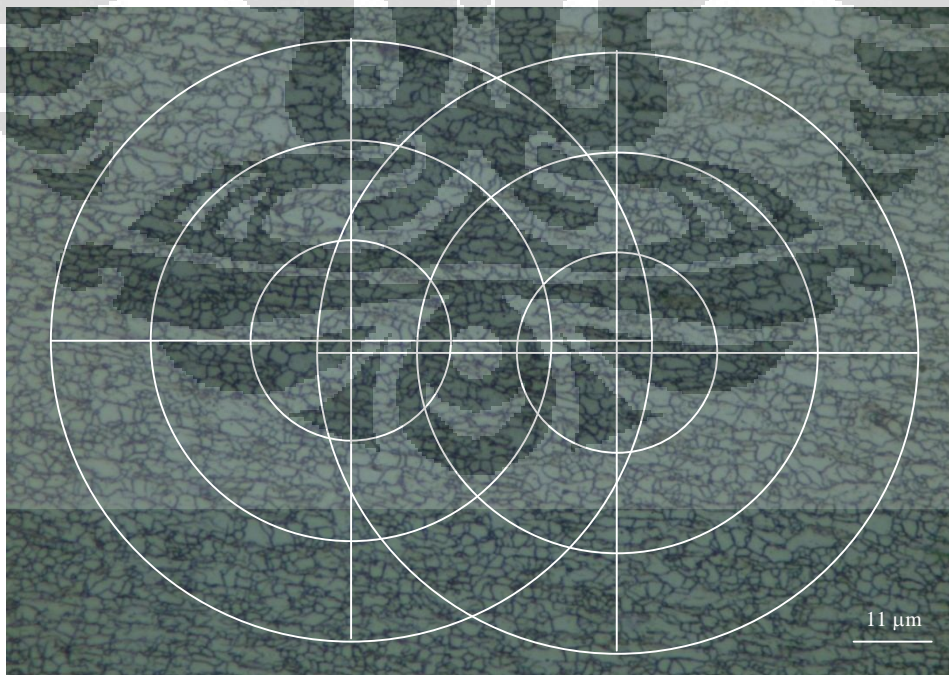
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $150 + 103 + 53 = 306$, lingkaran 2 = $141 + 95 + 50 = 286$

Rata-rata perpotongan = $(306 + 286)/2 = 296$ titik potong

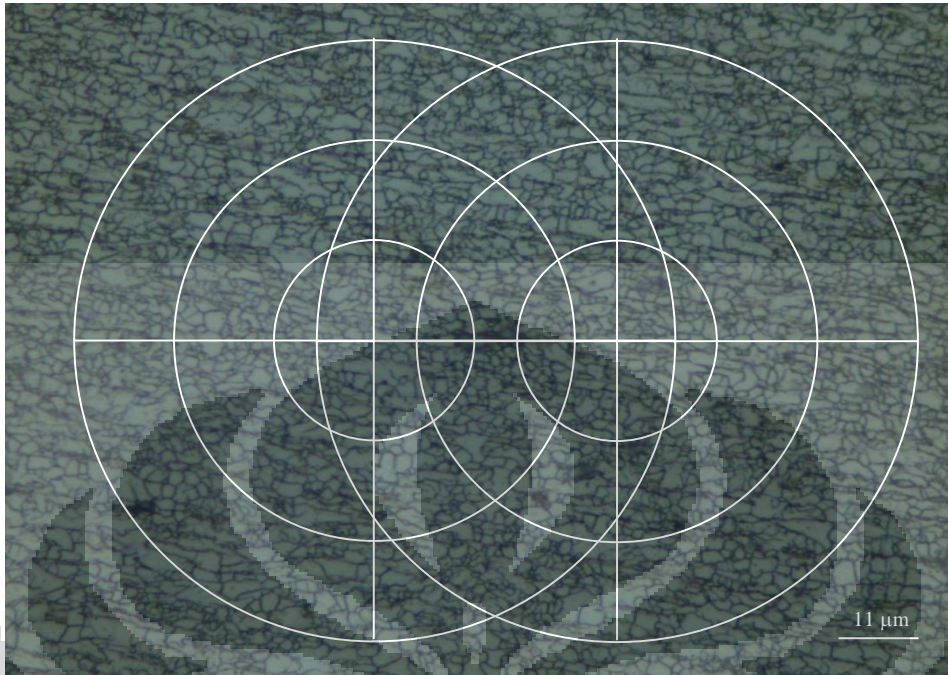
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $144 + 98 + 53 = 295$, lingkaran 2 = $142 + 88 + 48 = 278$

Rata-rata perpotongan = $(295 + 278)/2 = 286,5$ titik potong

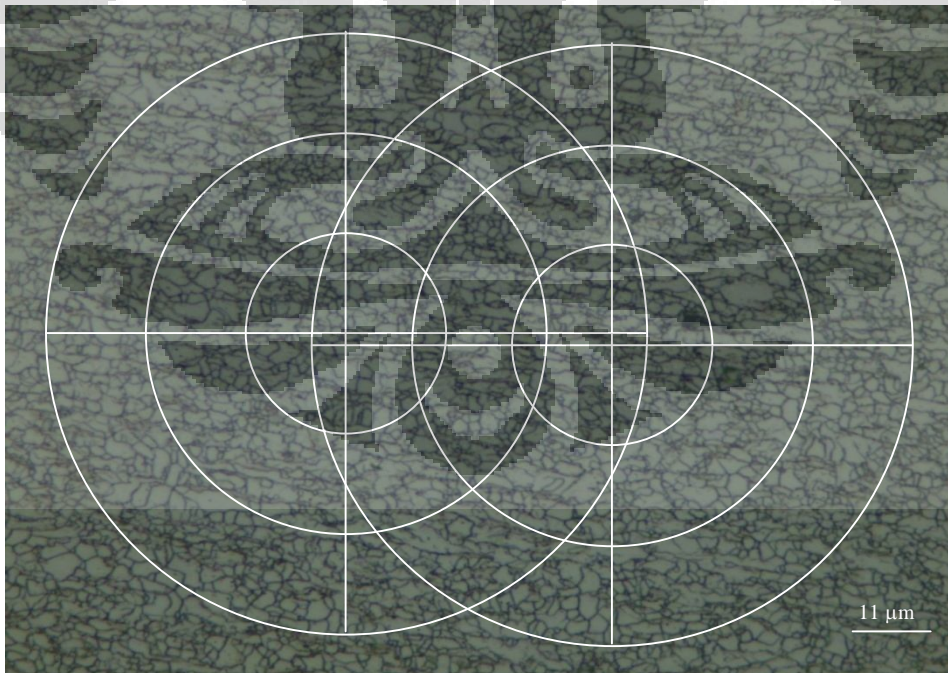
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $119 + 91 + 44 = 254$, lingkaran 2 = $136 + 82 + 44 = 262$

Rata-rata perpotongan = $(254 + 262)/2 = 258$ titik potong

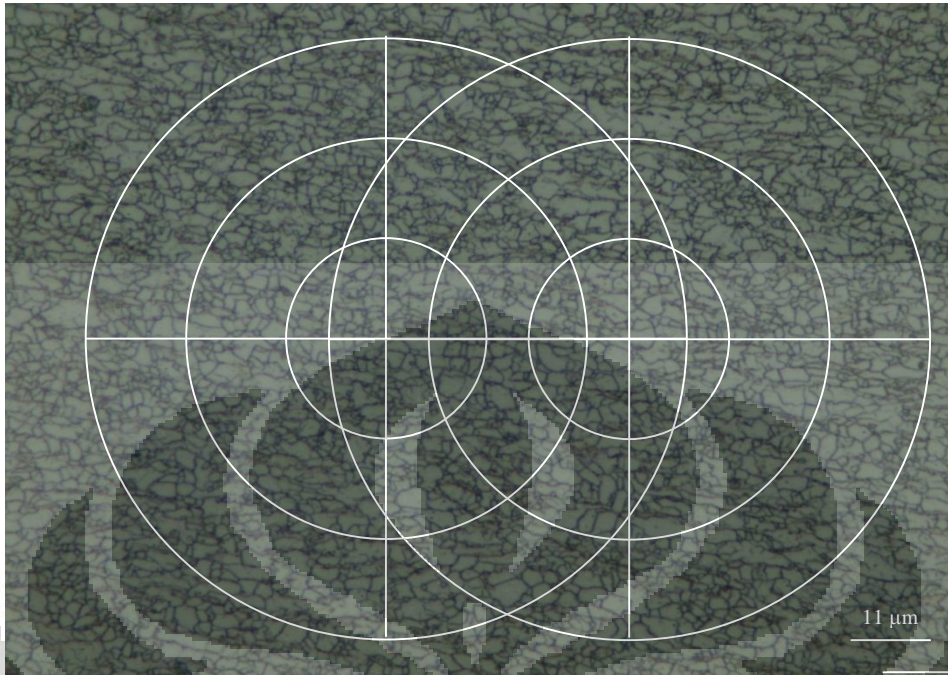
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $125 + 81 + 34 = 240$, lingkaran 2 = $130 + 83 + 44 = 257$

Rata-rata perpotongan = $(240 + 257)/2 = 248,5$ titik potong

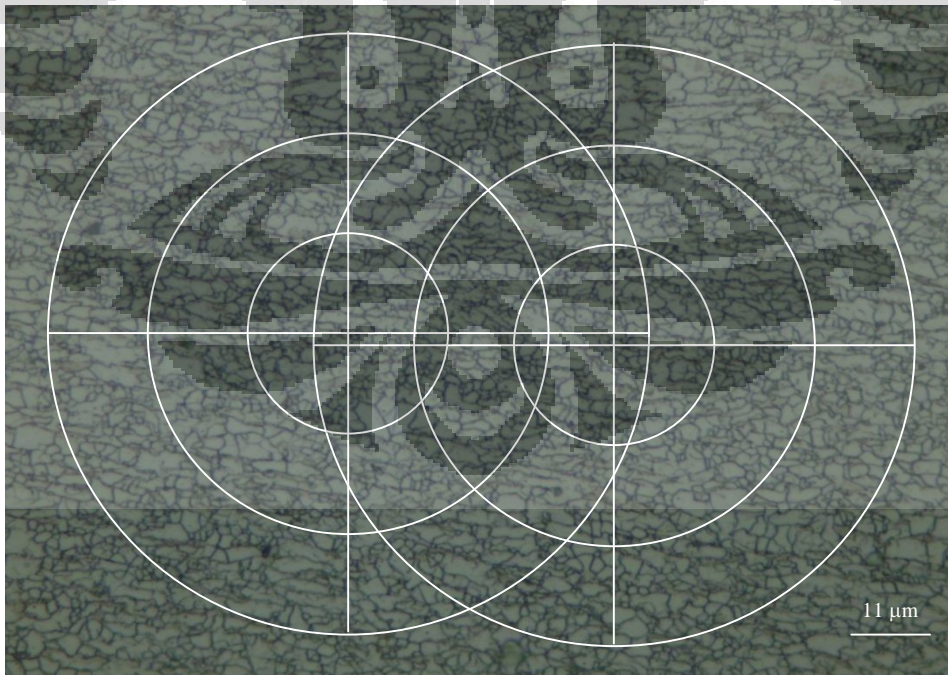
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $131 + 96 + 45 = 272$, lingkaran 2 = $140 + 87 + 46 = 273$

Rata-rata perpotongan = $(272 + 273)/2 = 272,5$ titik potong

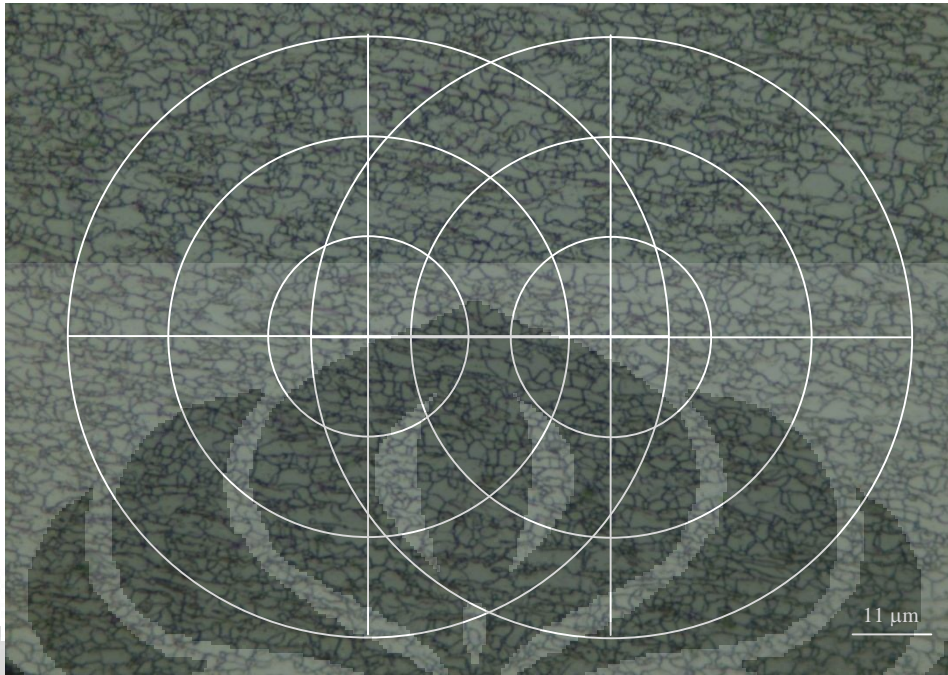
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $131 + 85 + 48 = 264$, lingkaran 2 = $118 + 87 + 52 = 257$

Rata-rata perpotongan = $(264 + 257)/2 = 260,5$ titik potong

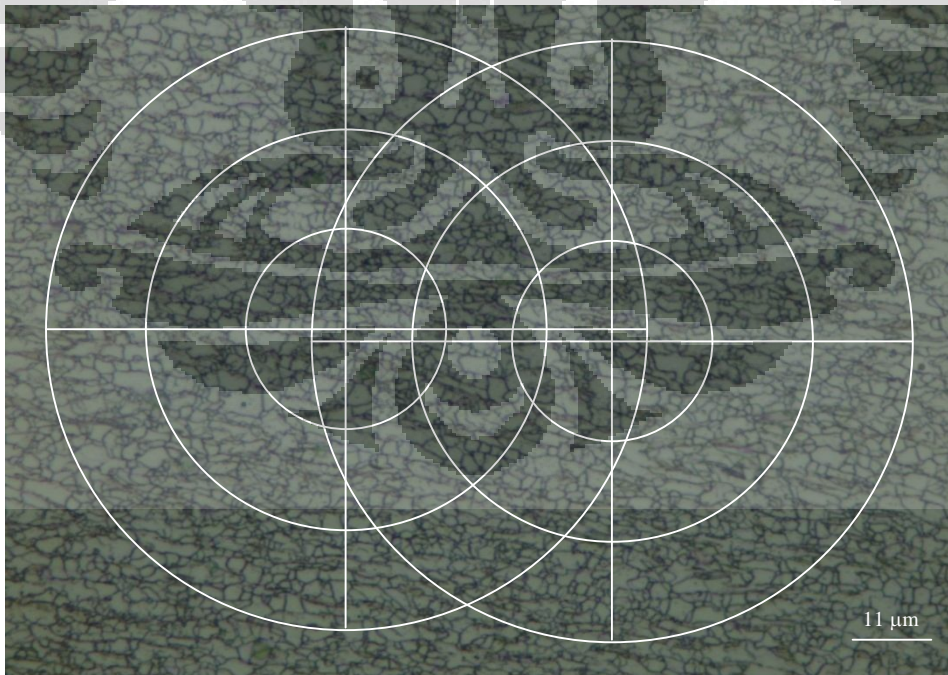
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $131 + 83 + 47 = 261$, lingkaran 2 = $127 + 93 + 47 = 267$

Rata-rata perpotongan = $(261 + 267)/2 = 264$ titik potong

8.

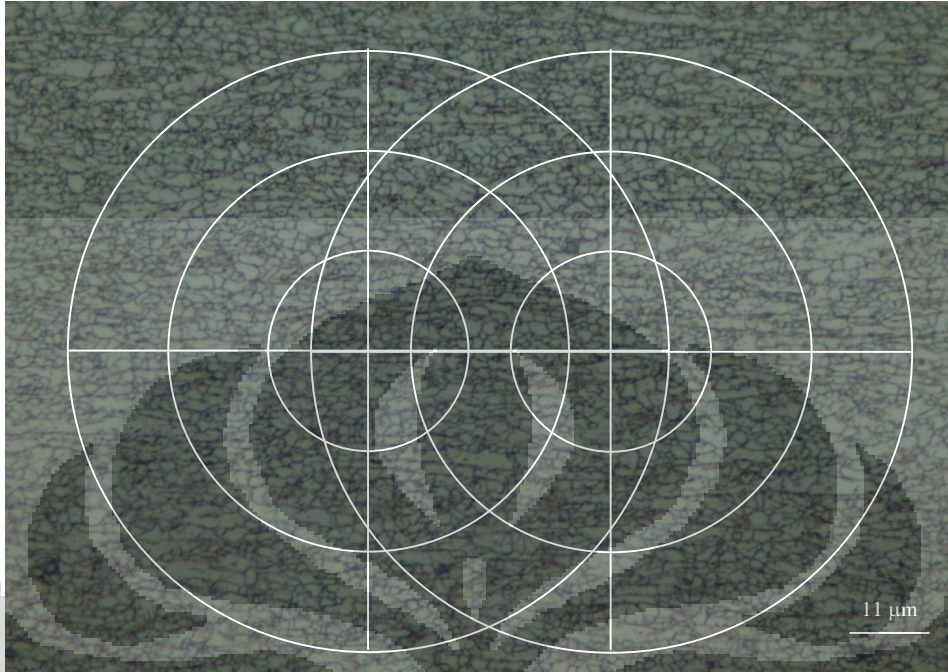


Perpotongan lingkaran 1 = $131 + 87 + 46 = 264$, lingkaran 2 = $124 + 83 + 42 = 249$

Rata-rata perpotongan = $(264 + 249)/2 = 255,5$ titik potong

Sampel 5 Titik 4 ($1,895 \pm 0,078 \mu\text{m}$)

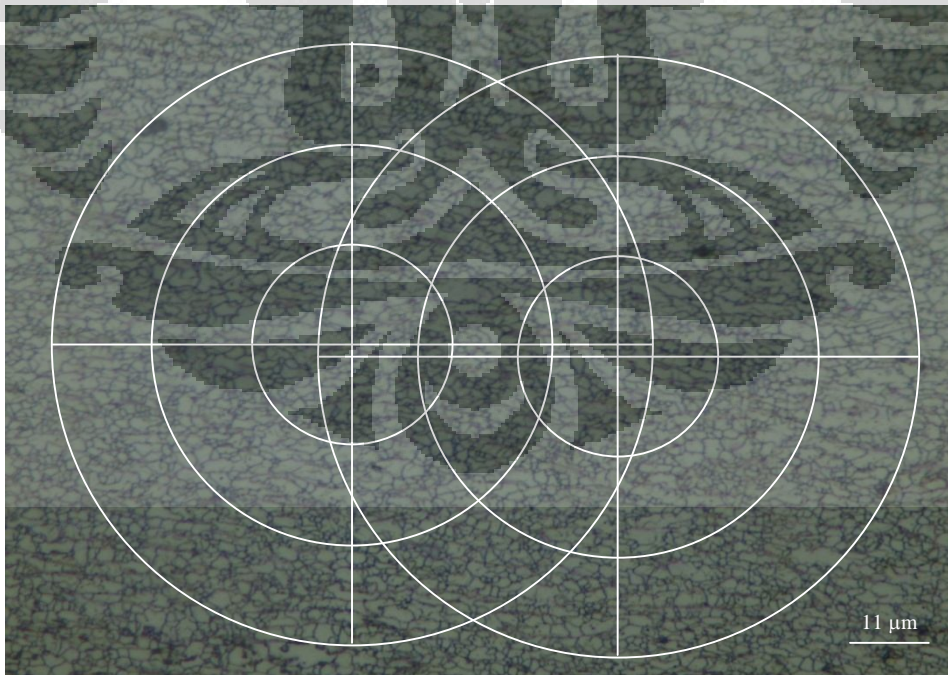
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $142 + 100 + 56 = 298$, lingkaran 2 = $150 + 105 + 52 = 307$

Rata-rata perpotongan = $(298 + 307)/2 = 302,5$ titik potong

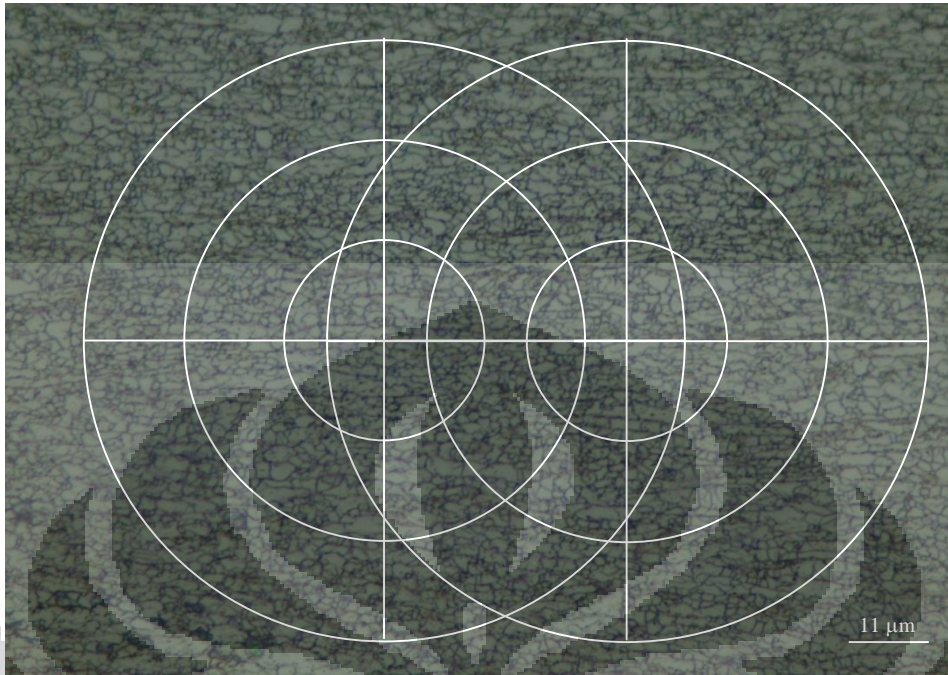
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $152 + 101 + 47 = 300$, lingkaran 2 = $168 + 100 + 61 = 329$

Rata-rata perpotongan = $(300 + 329)/2 = 314,5$ titik potong

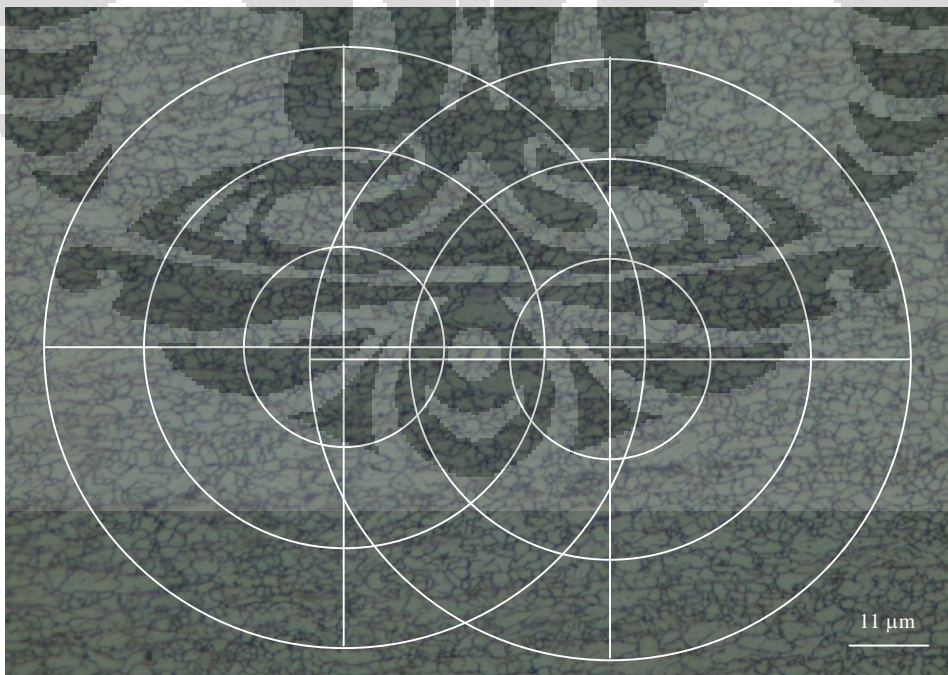
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $162 + 110 + 58 = 330$, lingkaran 2 = $157 + 103 + 56 = 316$

Rata-rata perpotongan = $(330 + 316)/2 = 323$ titik potong

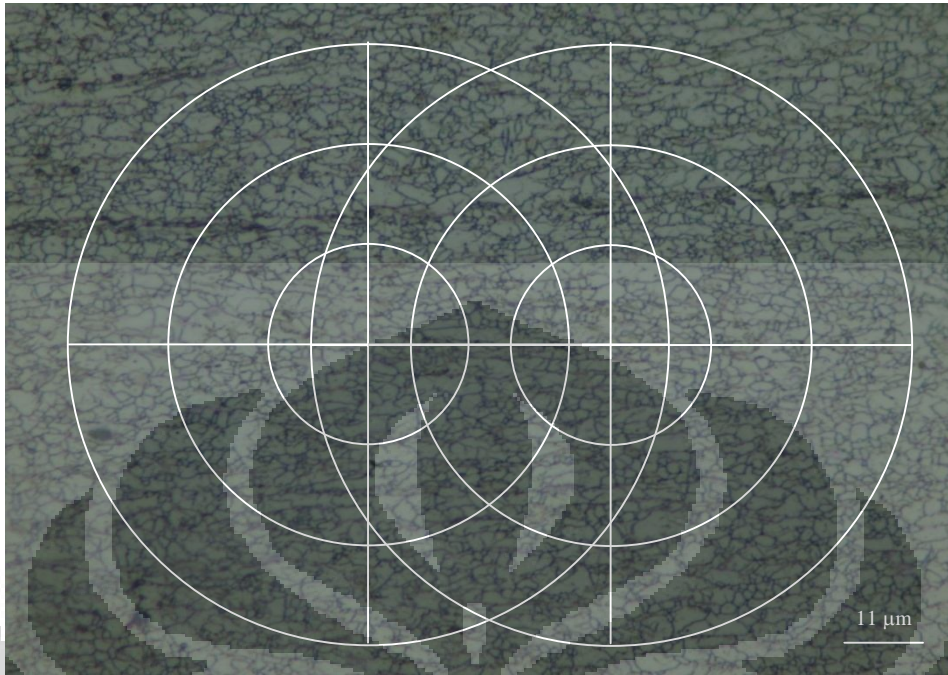
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $145 + 93 + 46 = 284$, lingkaran 2 = $147 + 102 + 47 = 296$

Rata-rata perpotongan = $(284 + 296)/2 = 290$ titik potong

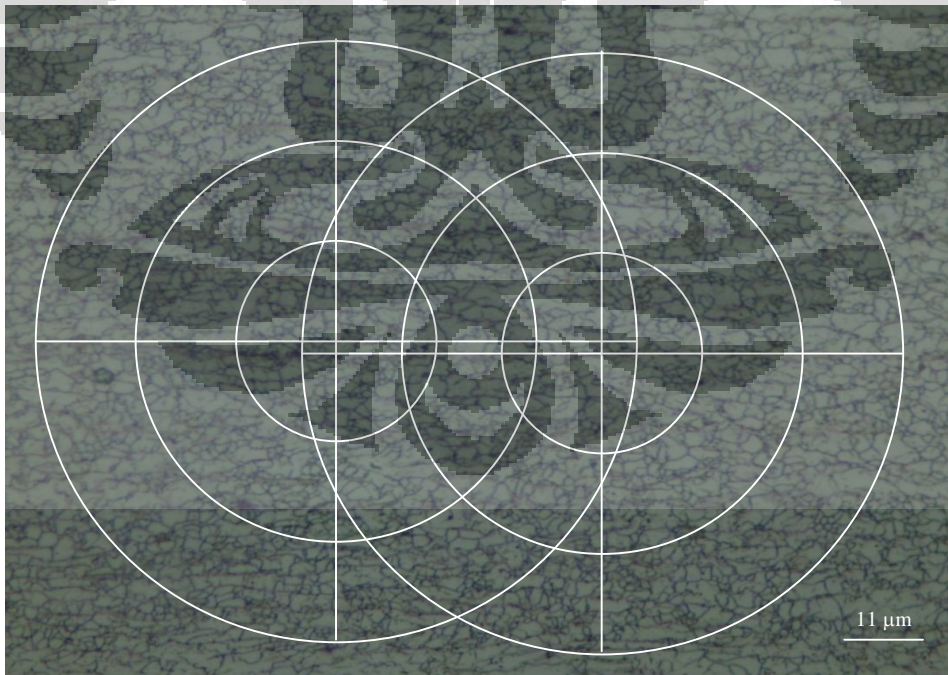
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $136 + 97 + 52 = 285$, lingkaran 2 = $149 + 102 + 54 = 305$

Rata-rata perpotongan = $(285 + 305)/2 = 295$ titik potong

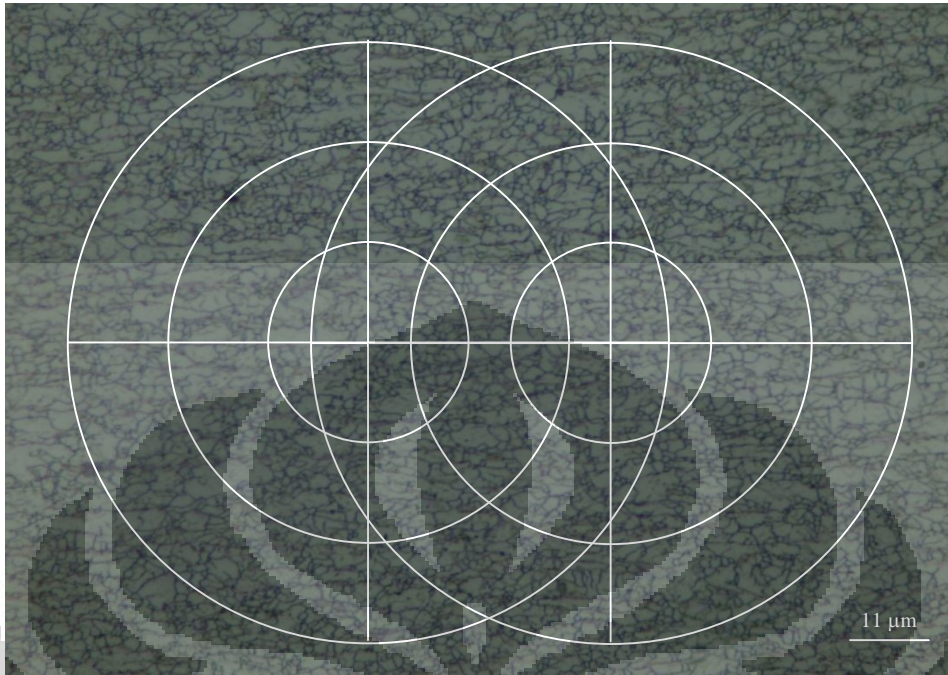
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $133 + 94 + 44 = 271$, lingkaran 2 = $142 + 94 + 45 = 281$

Rata-rata perpotongan = $(271 + 281)/2 = 276$ titik potong

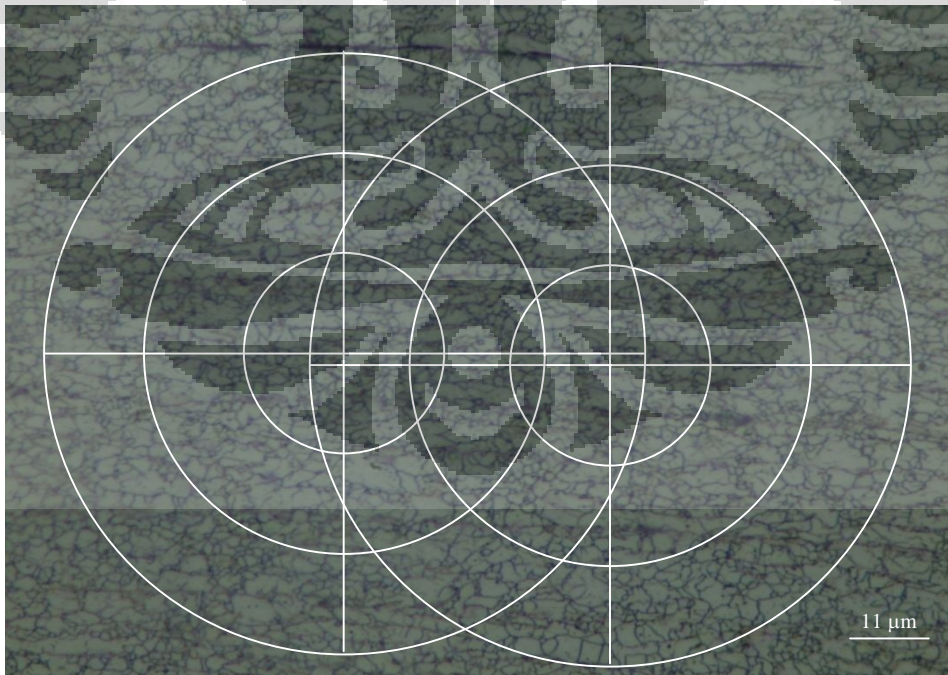
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $138 + 95 + 44 = 277$, lingkaran 2 = $149 + 102 + 51 = 302$

Rata-rata perpotongan = $(277 + 302)/2 = 289,5$ titik potong

8.

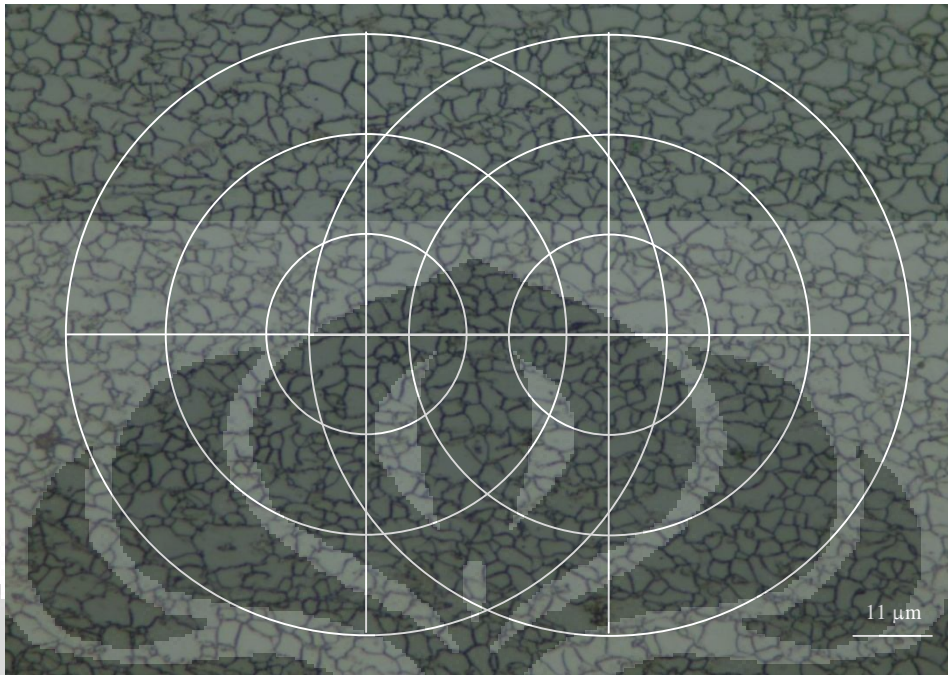


Perpotongan lingkaran 1 = $143 + 93 + 47 = 283$, lingkaran 2 = $138 + 91 + 50 = 279$

Rata-rata perpotongan = $(283 + 279)/2 = 281$ titik potong

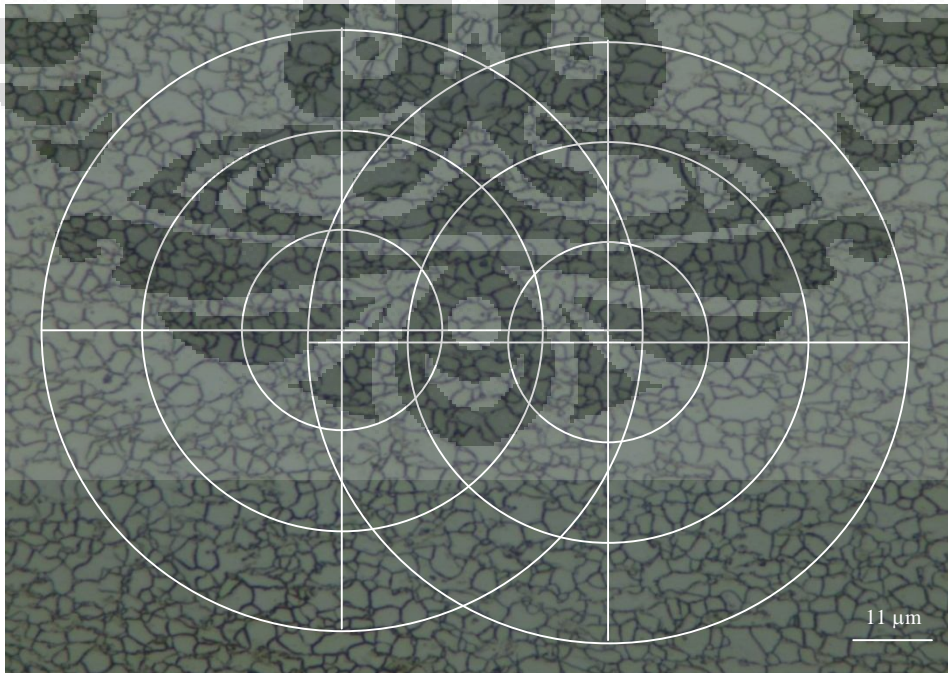
Sampel 7 Titik 1 ($3,021 \pm 0,196 \mu\text{m}$)

1.



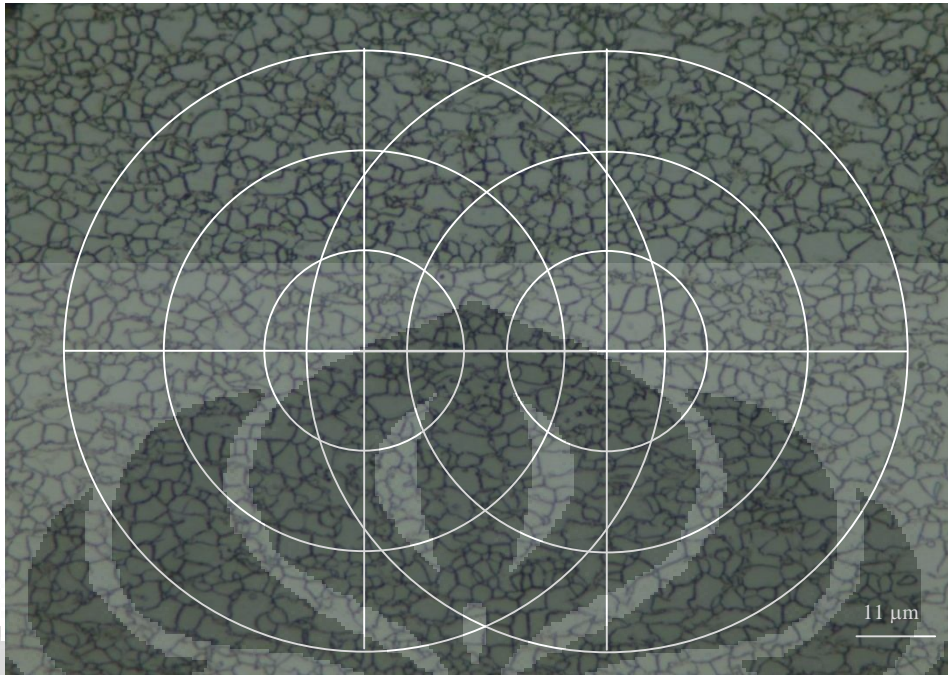
Perpotongan lingkaran 1 = $92+56+27=175$, lingkaran 2 = $94+59+28=181$
 Rata-rata perpotongan = $(175+181)/2 = 178$ titik potong

2.



Perpotongan lingkaran 1 = $99+73+31=203$, lingkaran 2 = $95+65+33=193$
 Rata-rata perpotongan = $(203+193)/2 = 198$ titik potong

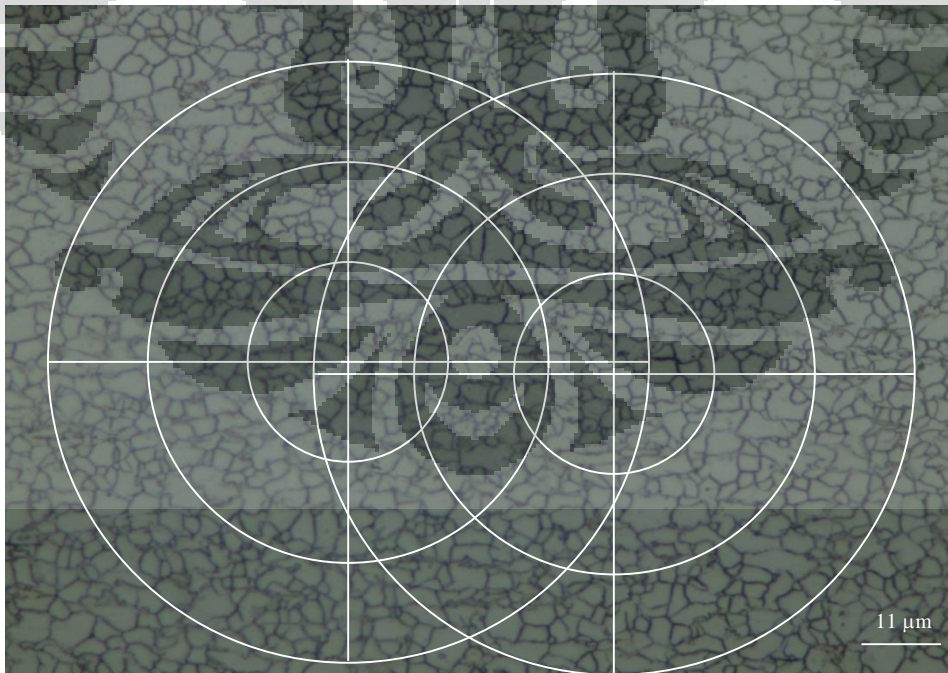
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $98+67+34=199$, lingkaran 2 = $102+67+31=199$

Rata-rata perpotongan = $(199+199)/2 = 199$ titik potong

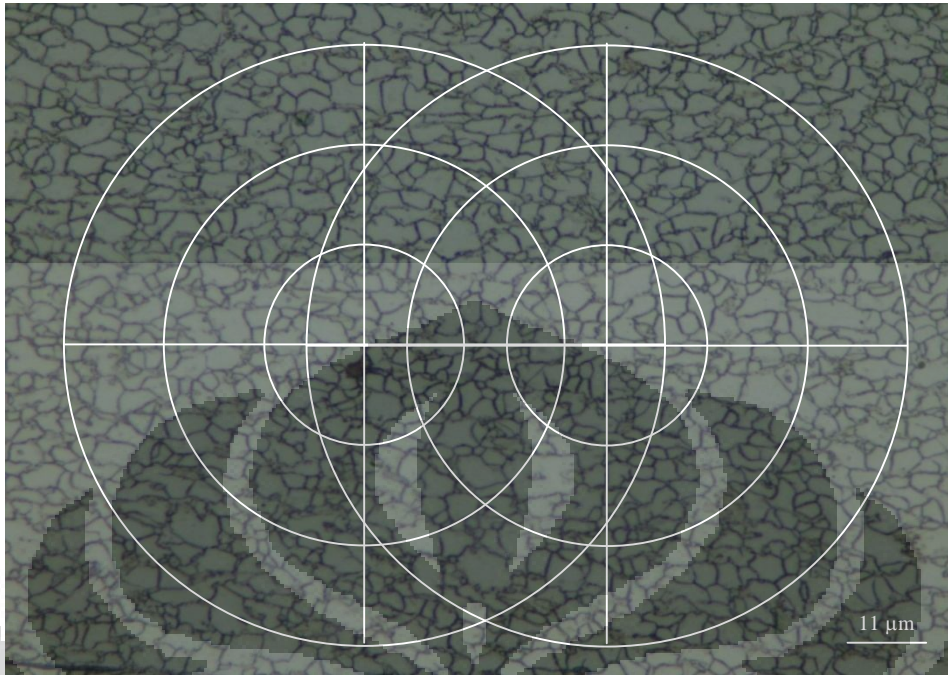
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $101+66+30=197$, lingkaran 2 = $89+60+26=175$

Rata-rata perpotongan = $(197+175)/2 = 186$ titik potong

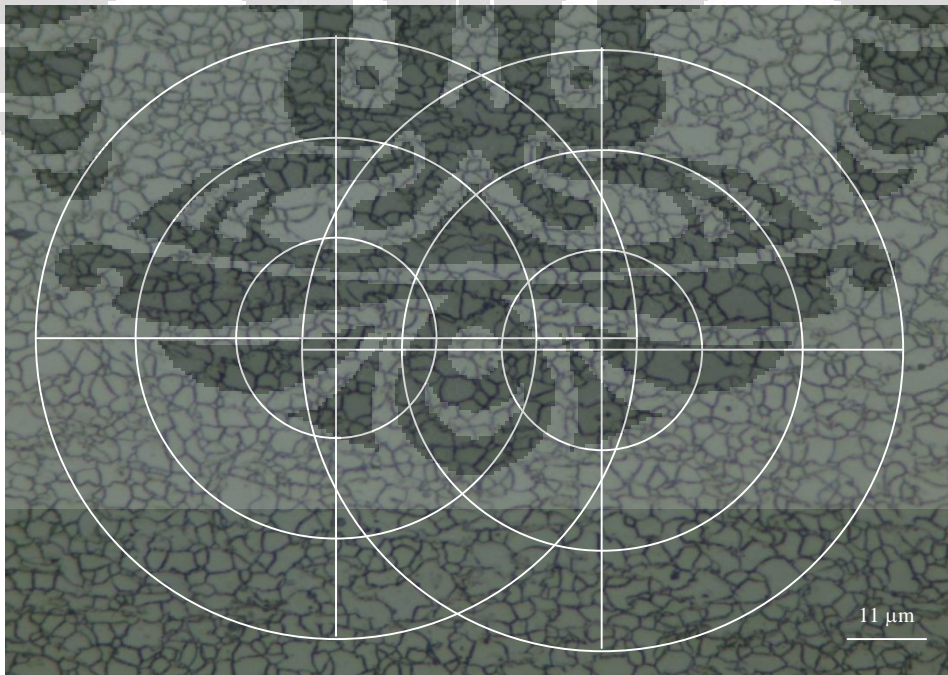
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $86+61+28=175$, lingkaran 2 = $89+58+30=177$

Rata-rata perpotongan = $(175+177)/2 = 176$ titik potong

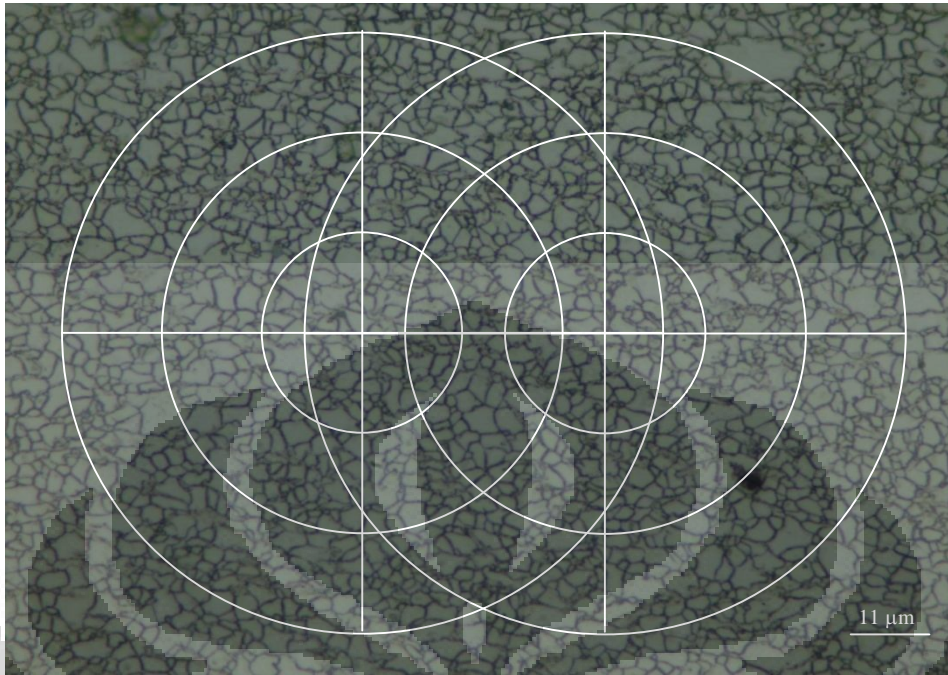
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $102+61+28=191$, lingkaran 2 = $93+64+32=189$

Rata-rata perpotongan = $(191+189)/2 = 190$ titik potong

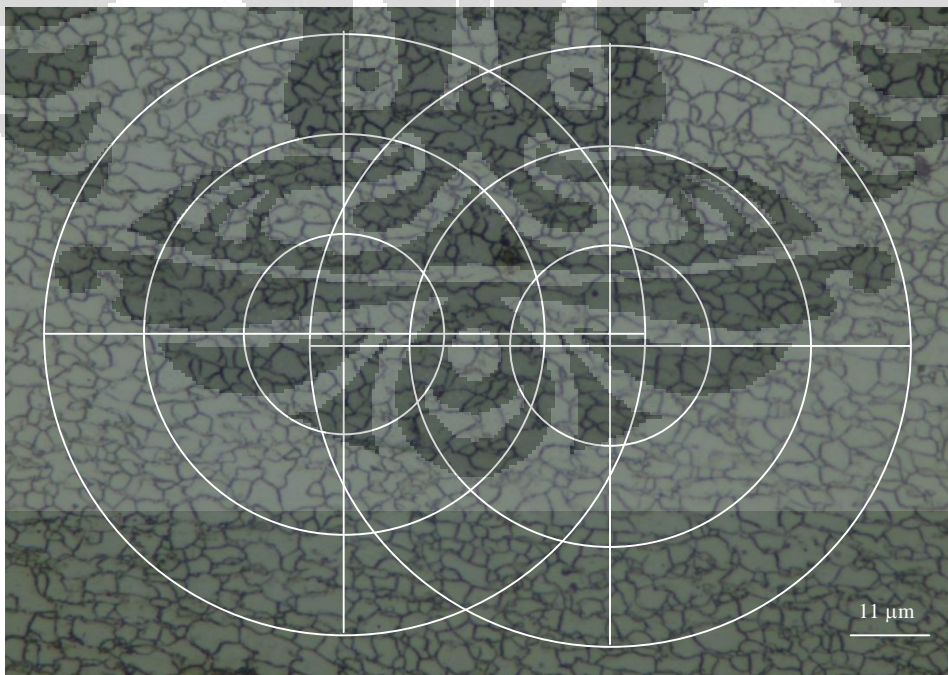
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $104+65+37=206$, lingkaran 2 = $98+72+32=202$

Rata-rata perpotongan = $(206+202)/2 = 204$ titik potong

8.

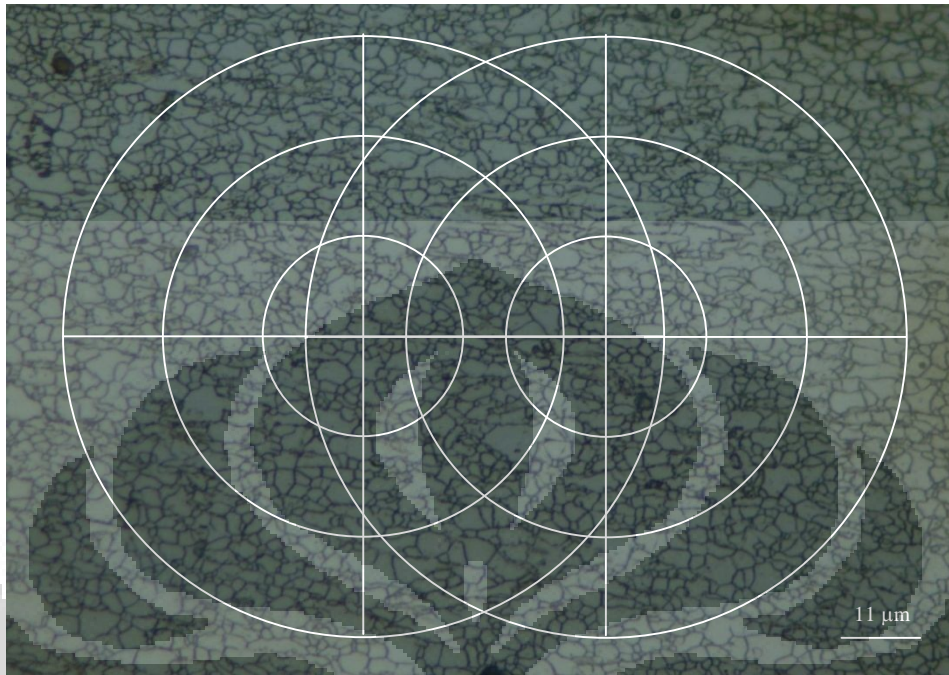


Perpotongan lingkaran 1 = $81+59+27=167$, lingkaran 2 = $89+59+27=175$

Rata-rata perpotongan = $(167+175)/2 = 171$ titik potong

Sampel 7 Titik 2 ($2,775 \pm 0,066 \mu\text{m}$)

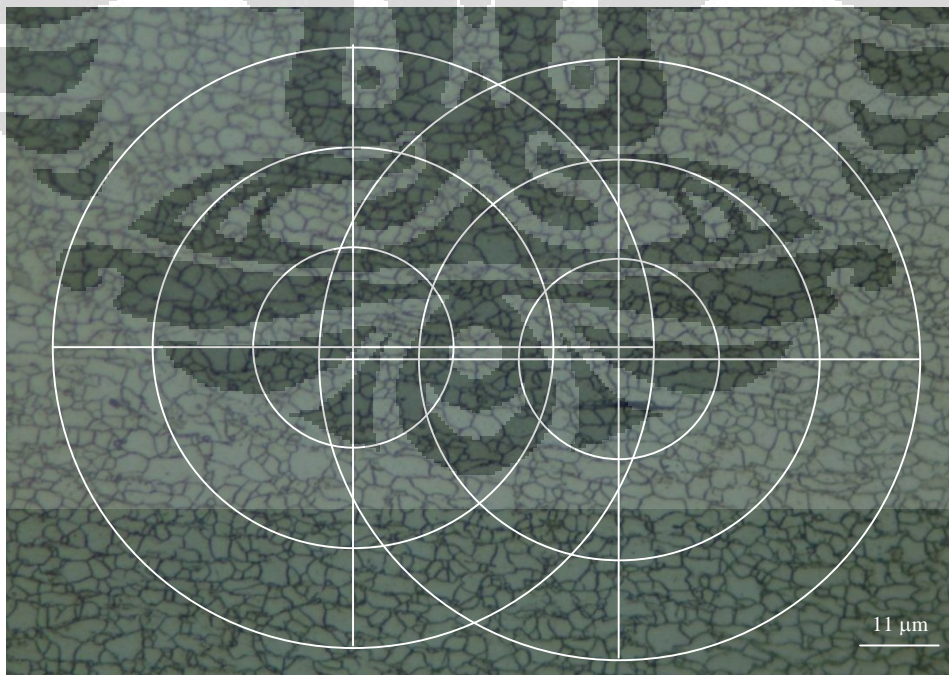
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $126+69+40=235$, lingkaran 2 = $119+70+37=226$

Rata-rata perpotongan = $(235+226)/2 = 230,5$ titik potong

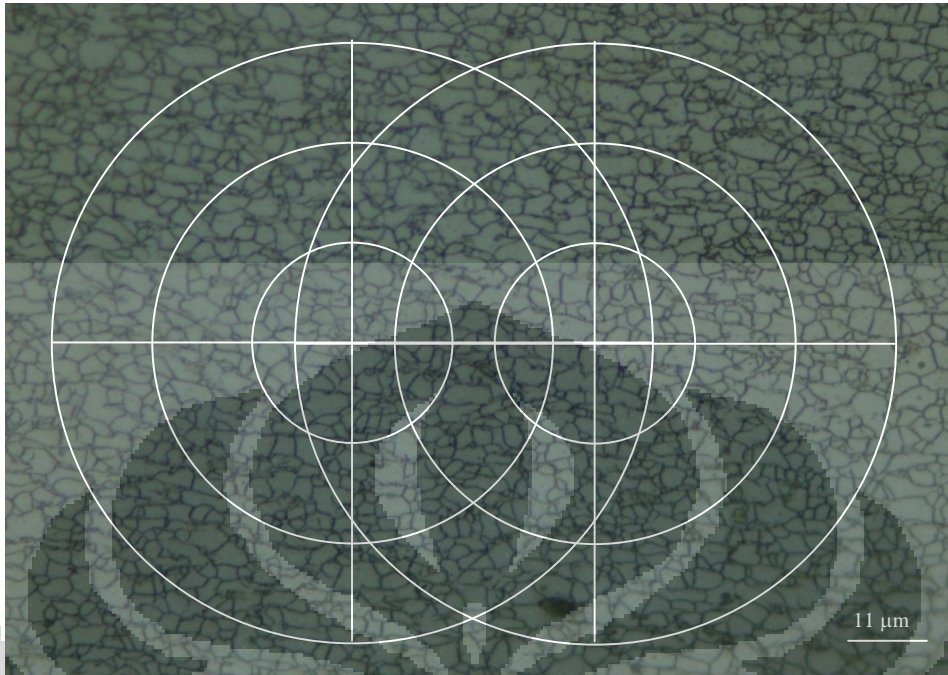
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $109+68+32=209$, lingkaran 2 = $109+73+33=215$

Rata-rata perpotongan = $(209+215)/2 = 212$ titik potong

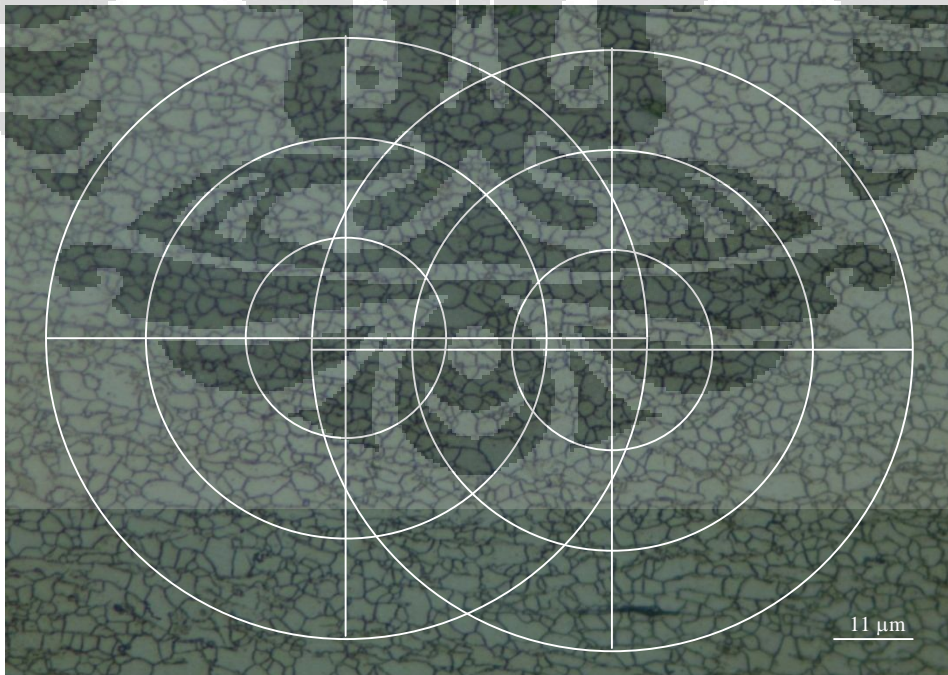
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $103+64+37=204$, lingkaran 2 = $99+74+33=206$

Rata-rata perpotongan = $(204+206)/2 = 205$ titik potong

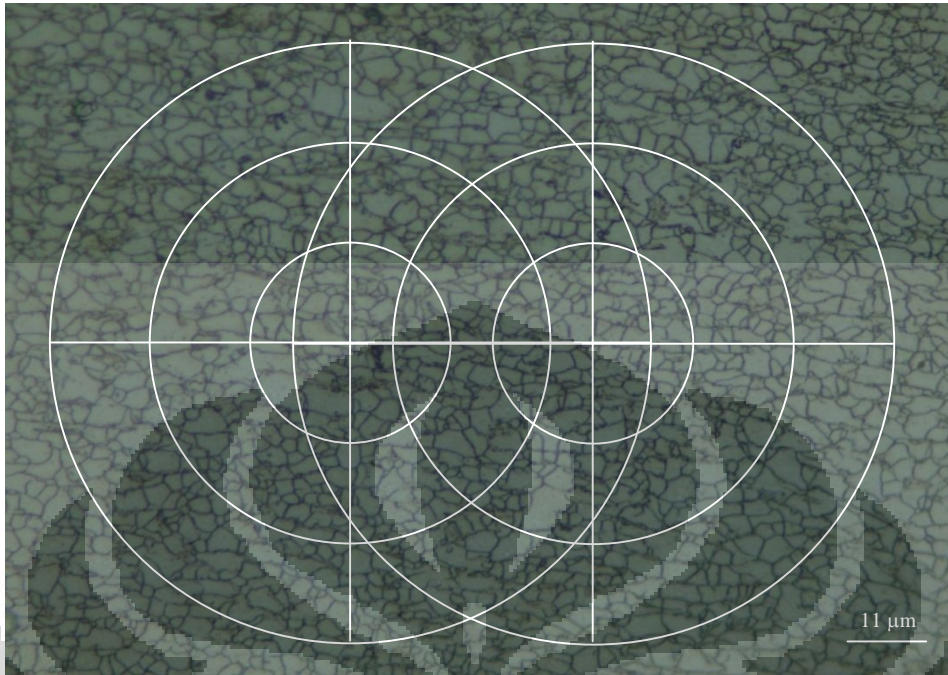
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $106+66+36=208$, lingkaran 2 = $105+64+33=202$

Rata-rata perpotongan = $(208+202)/2 = 205$ titik potong

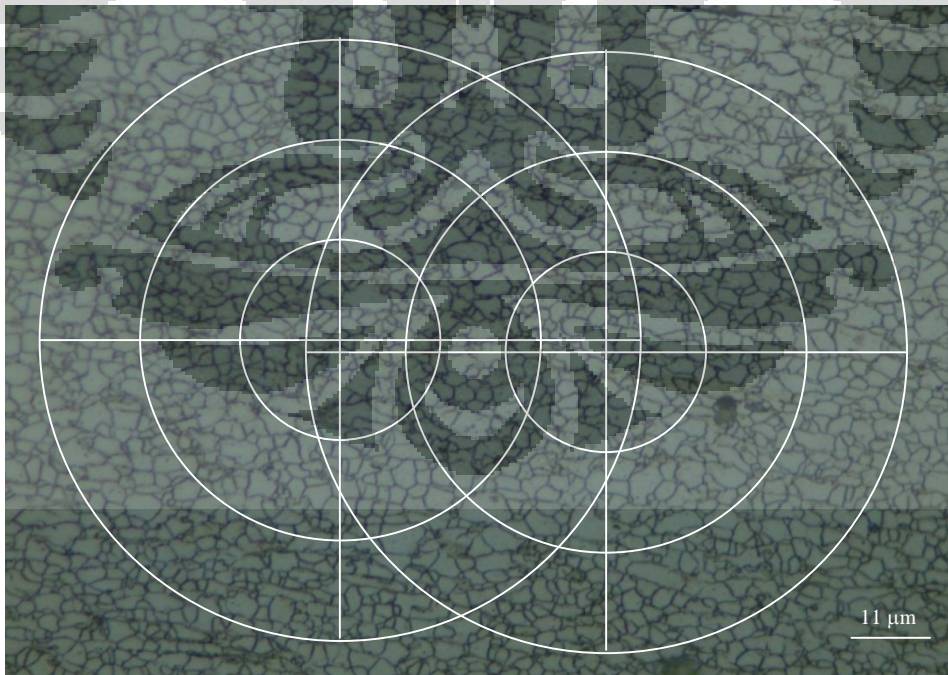
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $95+68+30=193$, lingkaran 2 = $98+66+34=198$

Rata-rata perpotongan = $(193+198)/2 = 195,5$ titik potong

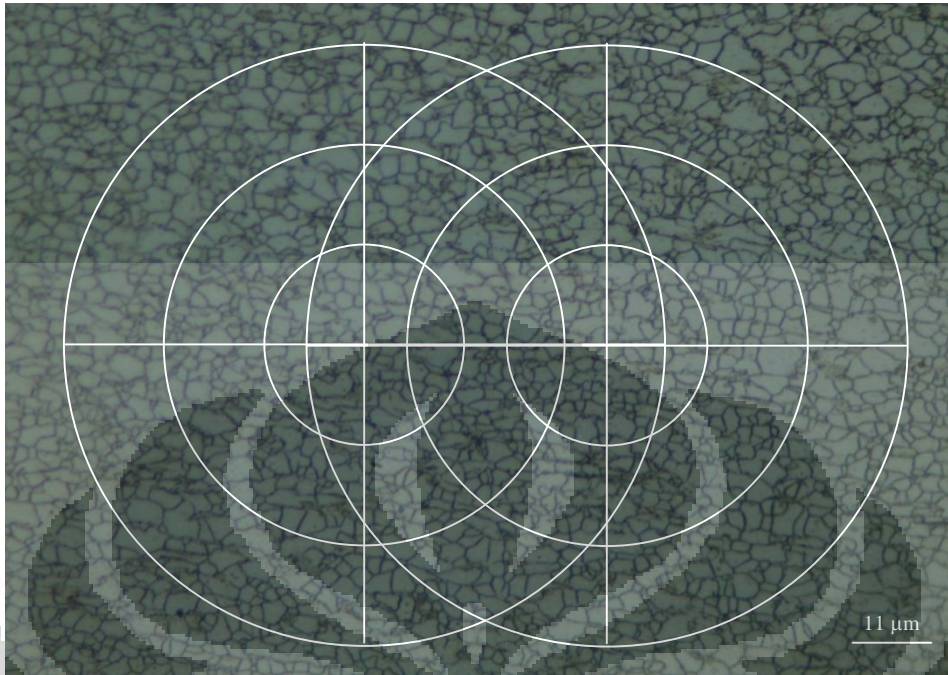
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $102+70+35=207$, lingkaran 2 = $101+67+35= 203$

Rata-rata perpotongan = $(207+203)/2 = 205$ titik potong

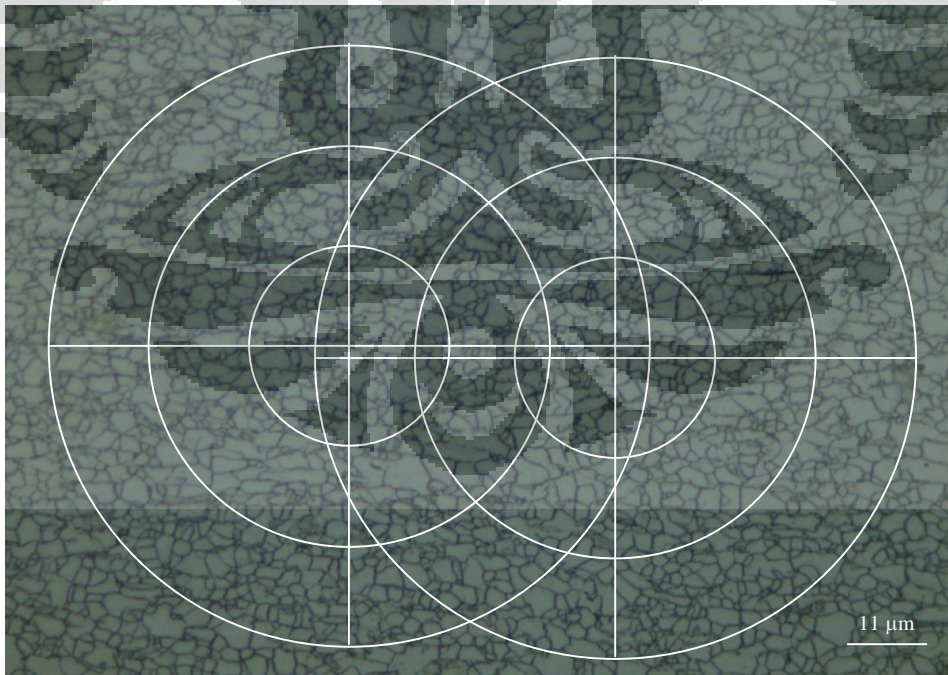
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $104+71+35=210$, lingkaran 2 = $105+65+36=206$

Rata-rata perpotongan = $(210+206)/2 = 208$ titik potong

8.

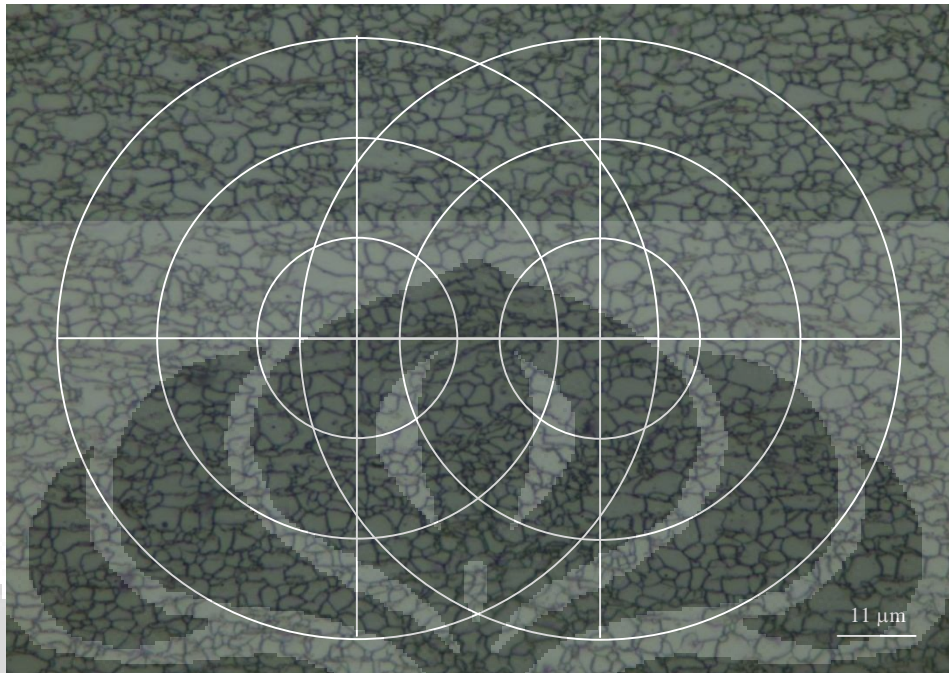


Perpotongan lingkaran 1 = $108+68+33=209$, lingkaran 2 = $112+71+38=221$

Rata-rata perpotongan = $(209+221)/2 = 215$ titik potong

Sampel 7 Titik 3 ($2,768 \pm 0,081 \mu\text{m}$)

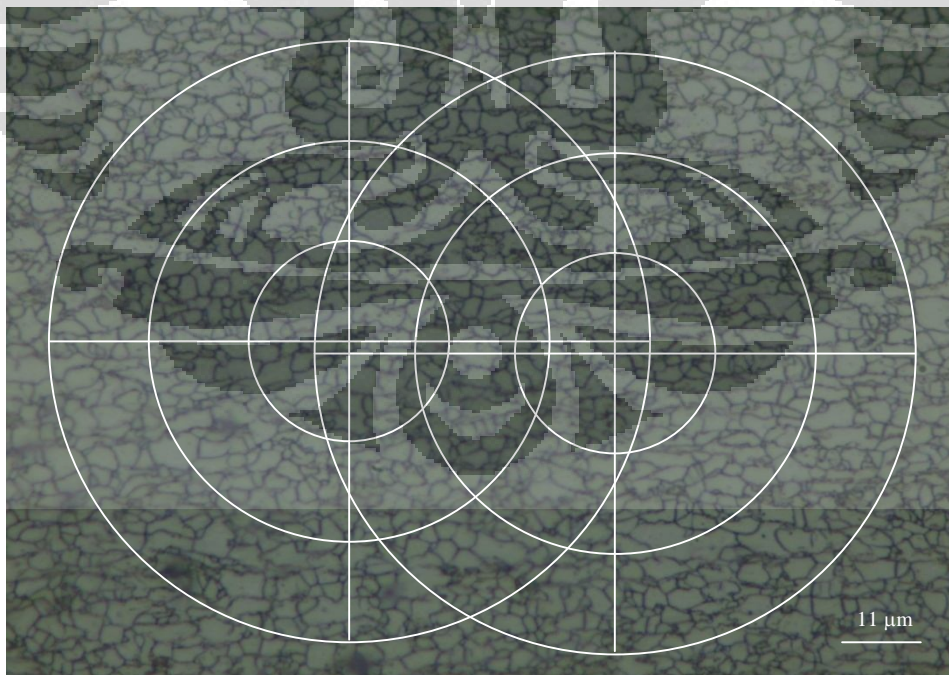
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $101+64+30=195$, lingkaran 2 = $101+62+32=195$

Rata-rata perpotongan = $(195+195)/2 = 195$ titik potong

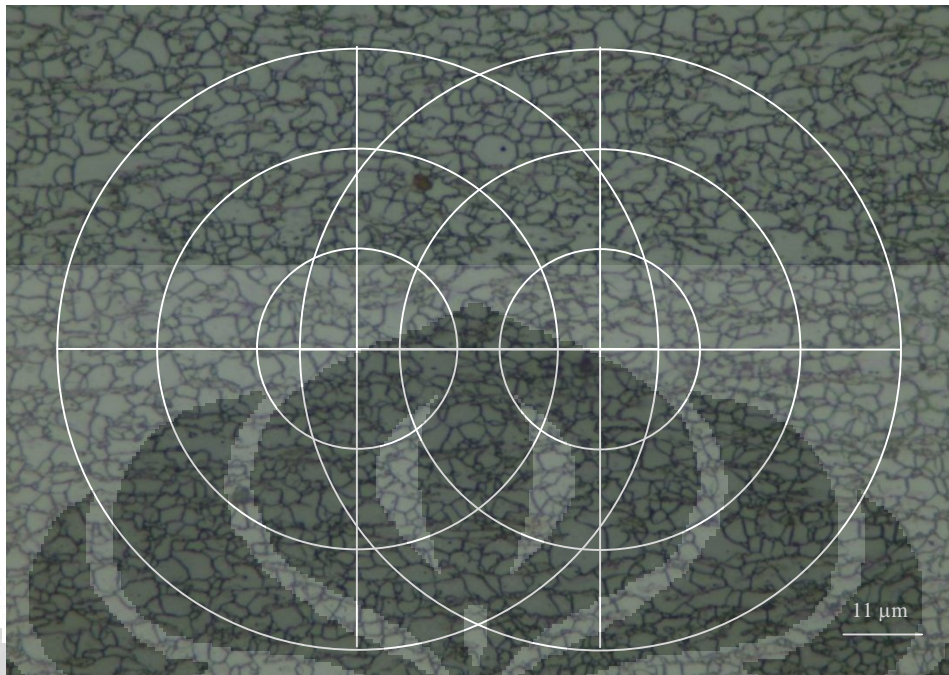
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $97+64+32=193$, lingkaran 2 = $99+62+34=195$

Rata-rata perpotongan = $(193+195)/2 = 194$ titik potong

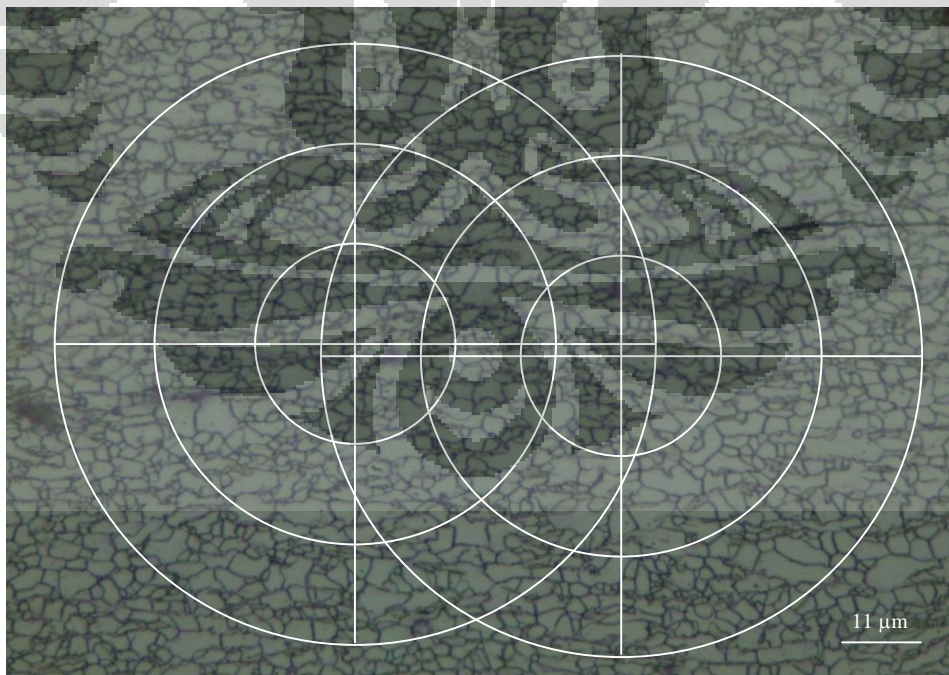
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $99+71+31=201$, lingkaran 2 = $95+70+36=201$

Rata-rata perpotongan = $(201+201)/2 = 201$ titik potong

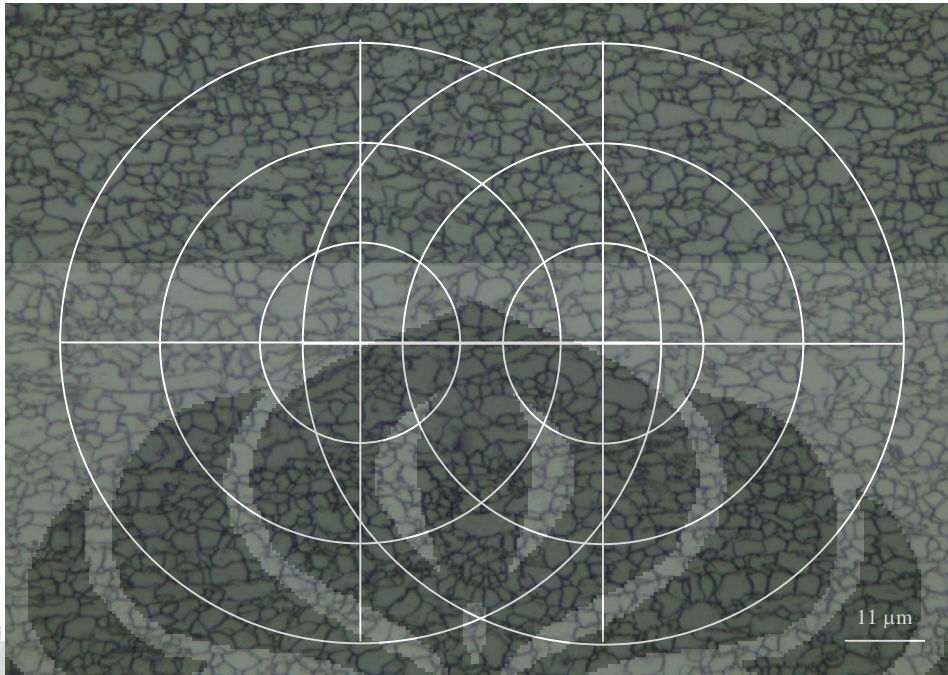
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $106+73+34=213$, lingkaran 2 = $107+71+33=211$

Rata-rata perpotongan = $(213+211)/2 = 212$ titik potong

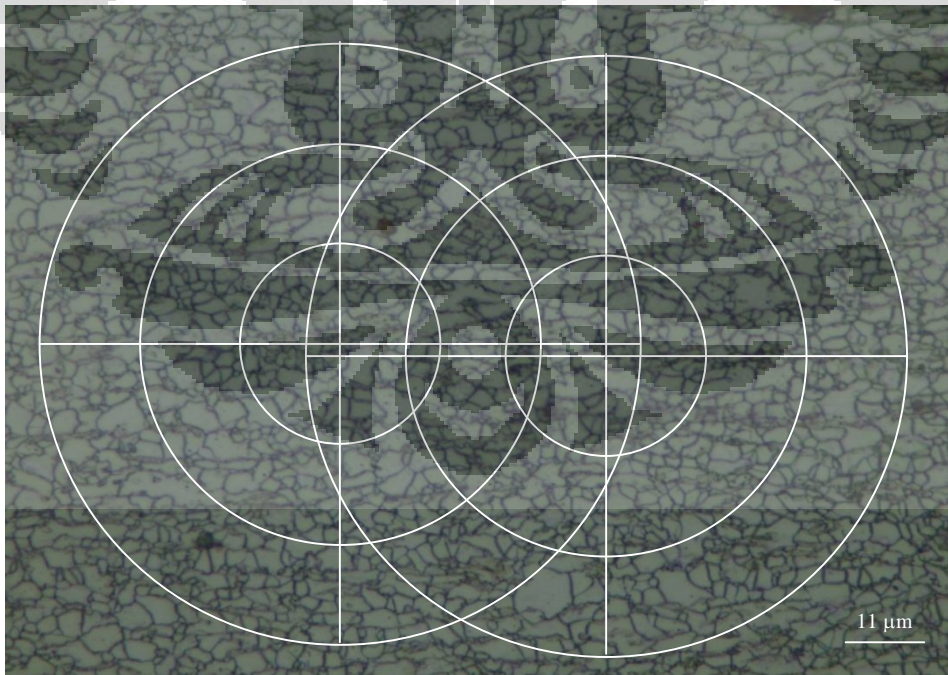
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $106+66+32=204$, lingkaran 2 = $99+67+32=198$

Rata-rata perpotongan = $(204+198)/2 = 201$ titik potong

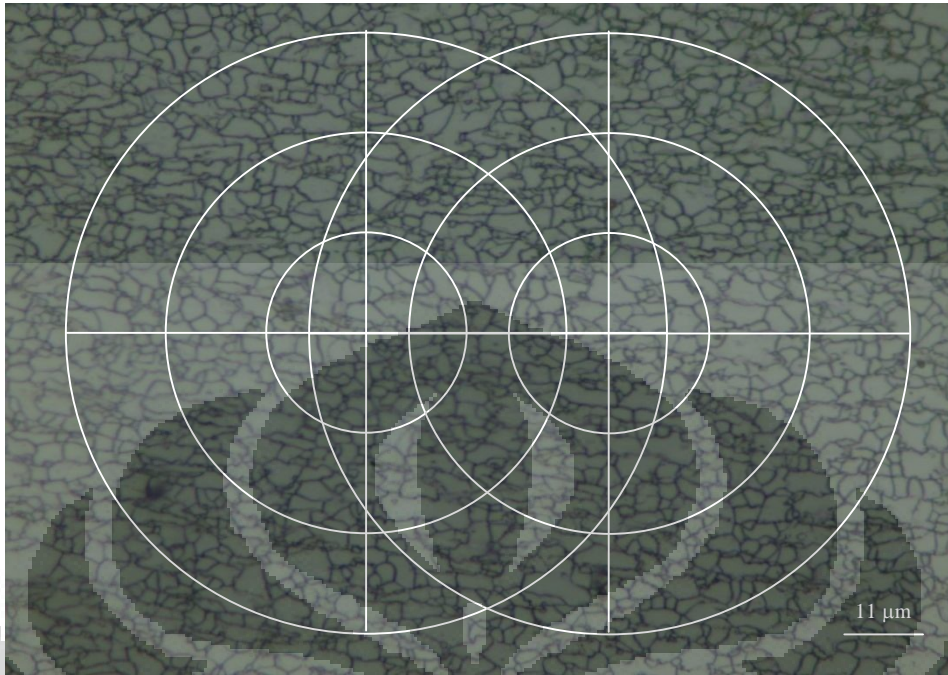
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $105+69+32=206$, lingkaran 2 = $107+73+33=213$

Rata-rata perpotongan = $(206+213)/2 = 209,5$ titik potong

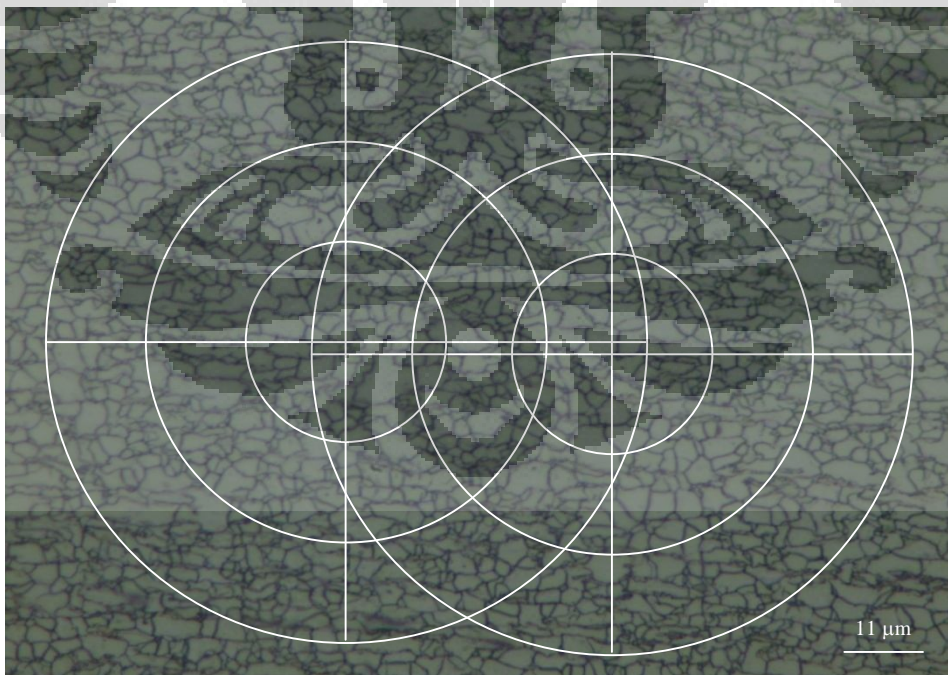
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $98+68+33=199$, lingkaran 2 = $97+68+32=197$

Rata-rata perpotongan = $(199+197)/2 = 198$ titik potong

8.

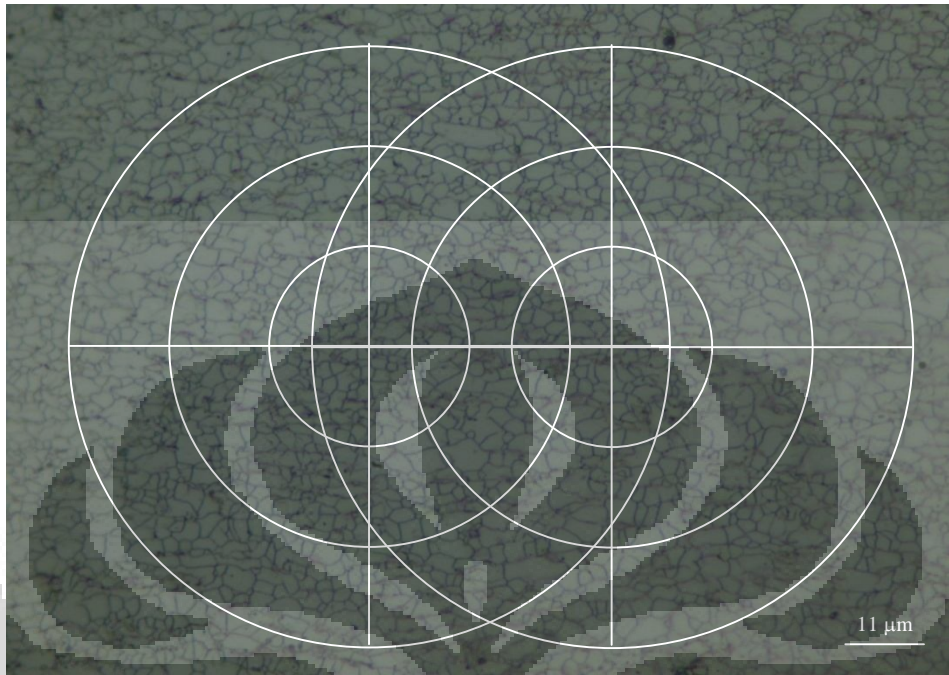


Perpotongan lingkaran 1 = $97+68+34=199$, lingkaran 2 = $96+64+33=193$

Rata-rata perpotongan = $(199+193)/2 = 196$ titik potong

Sampel 7 Titik 4 ($2,534 \pm 0,141 \mu\text{m}$)

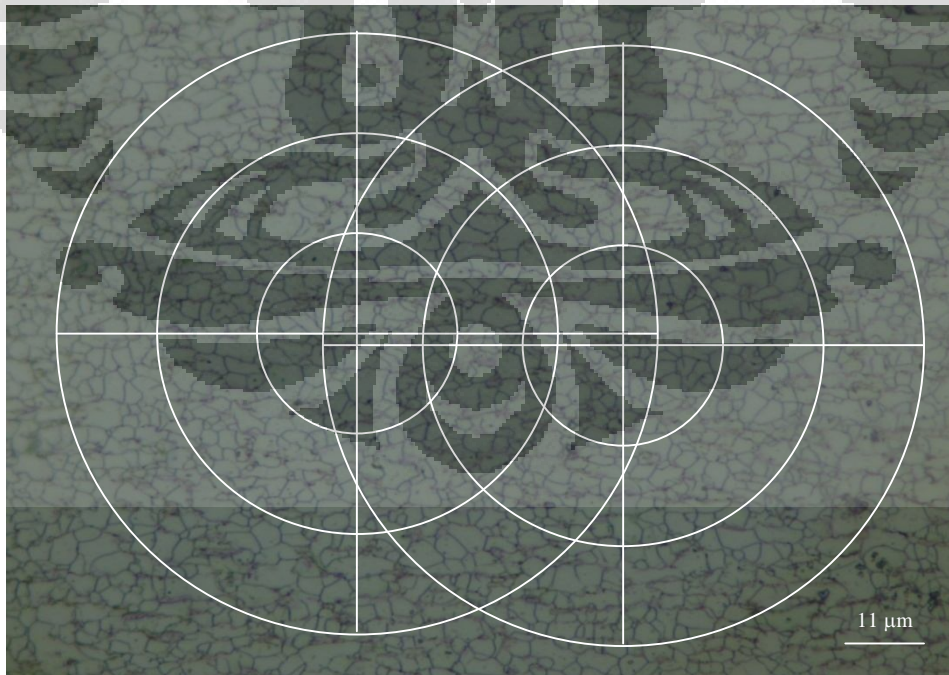
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $106 + 81 + 39 = 226$, lingkaran 2 = $125 + 73 + 39 = 237$

Rata-rata perpotongan = $(226 + 237)/2 = 231,5$ titik potong

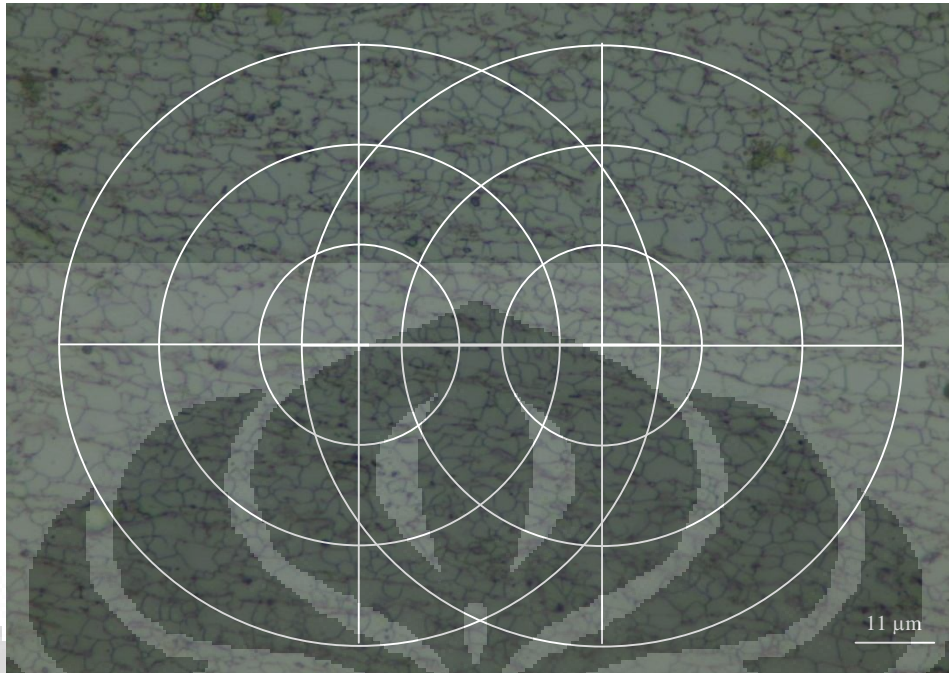
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $114 + 79 + 35 = 228$, lingkaran 2 = $110 + 73 + 35 = 218$

Rata-rata perpotongan = $(228 + 218)/2 = 223$ titik potong

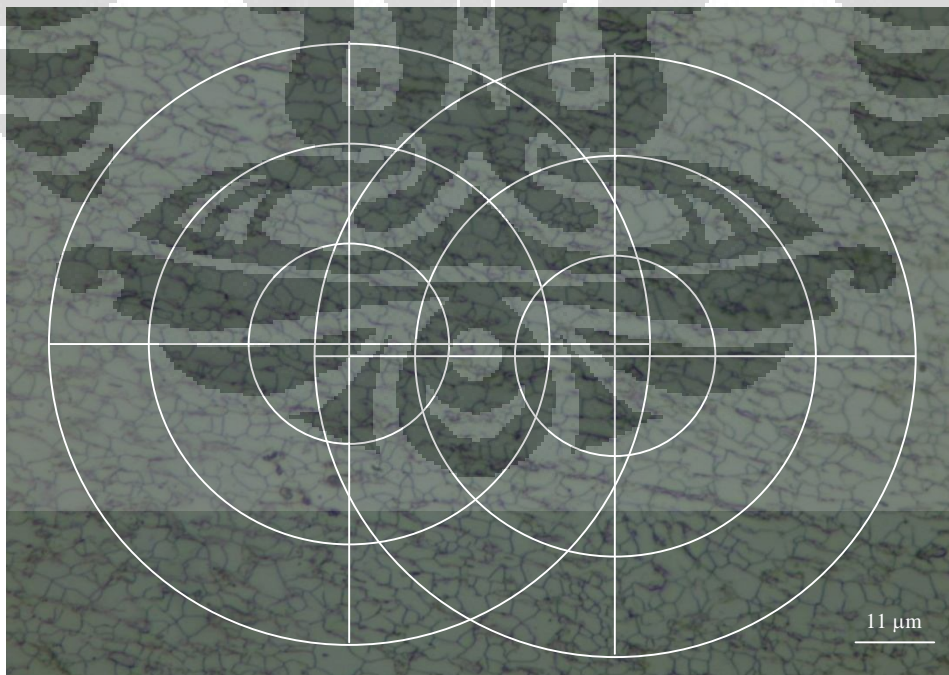
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $102 + 68 + 33 = 203$, lingkaran 2 = $100 + 75 + 36 = 211$

Rata-rata perpotongan = $(203 + 211)/2 = 207$ titik potong

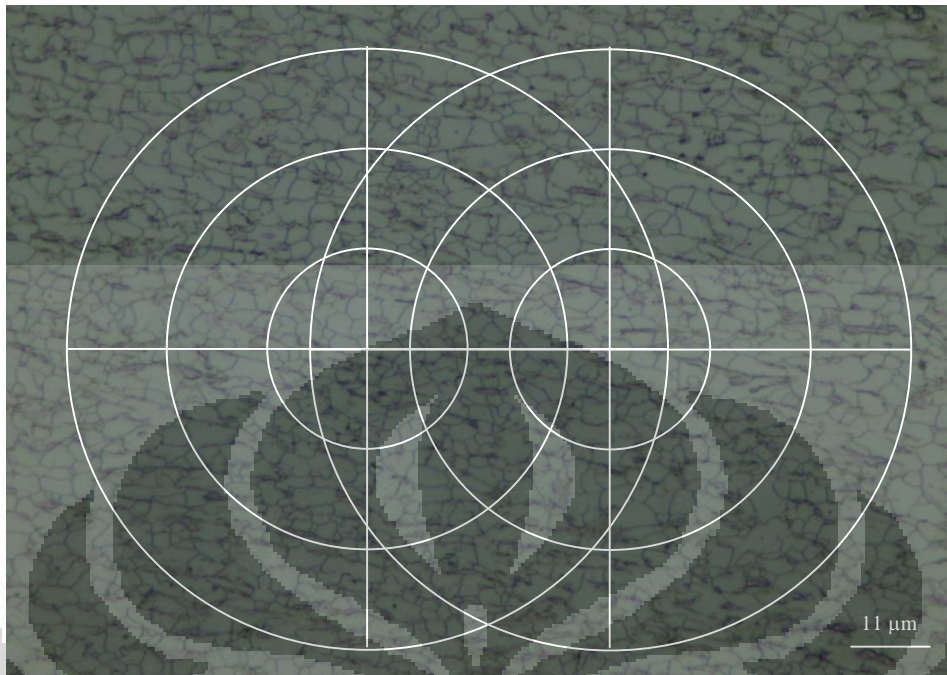
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $102 + 72 + 40 = 214$, lingkaran 2 = $103 + 75 + 37 = 215$

Rata-rata perpotongan = $(214 + 215)/2 = 214,5$ titik potong

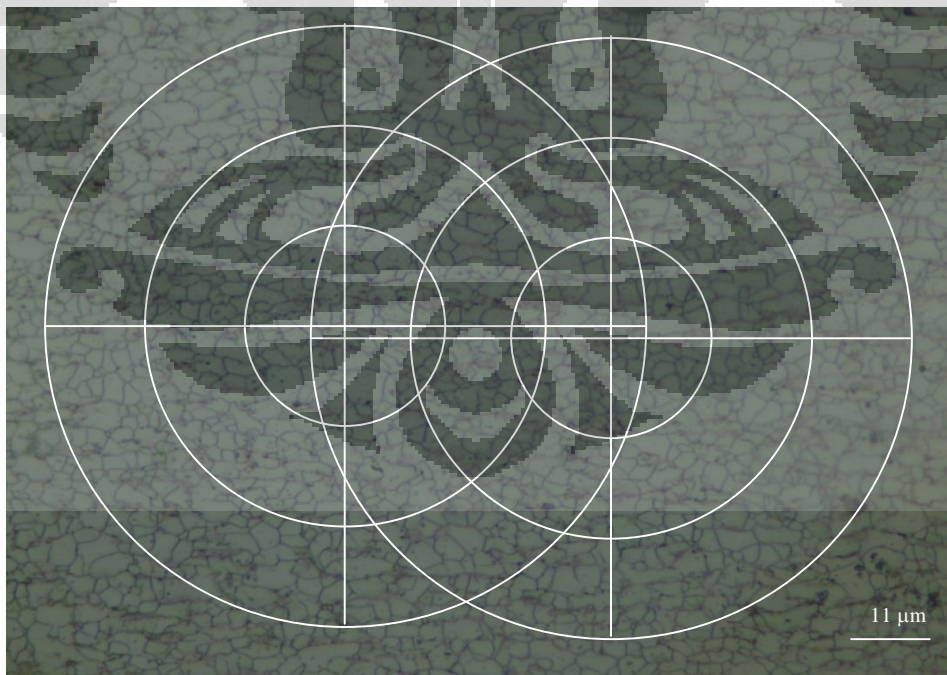
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $103 + 68 + 38 = 209$, lingkaran 2 = $103 + 73 + 34 = 210$

Rata-rata perpotongan = $(209 + 210)/2 = 209,5$ titik potong

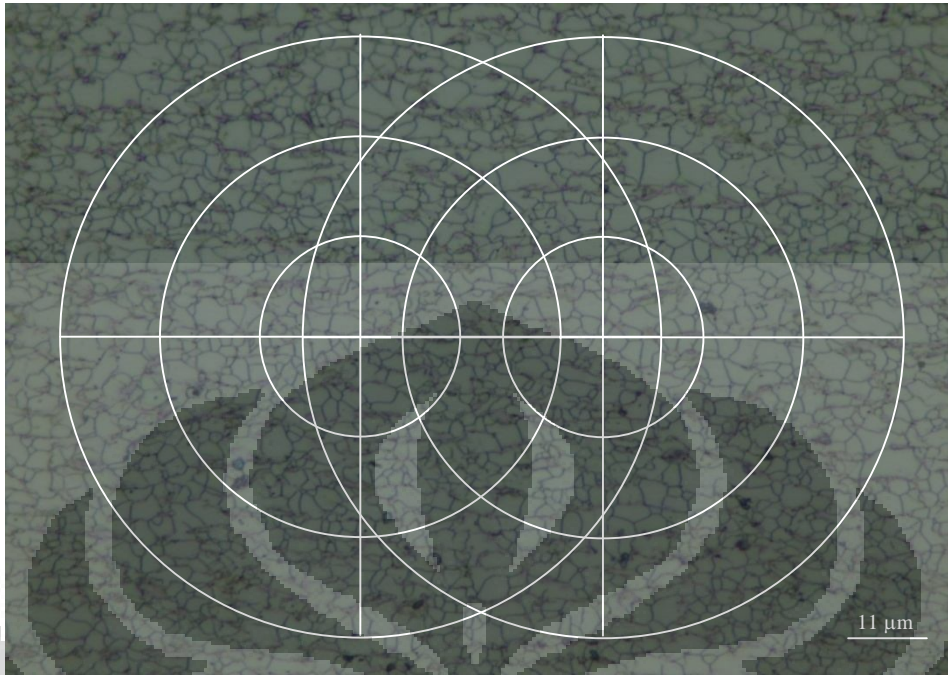
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $126 + 83 + 38 = 247$, lingkaran 2 = $110 + 82 + 40 = 232$

Rata-rata perpotongan = $(232 + 247)/2 = 239,5$ titik potong

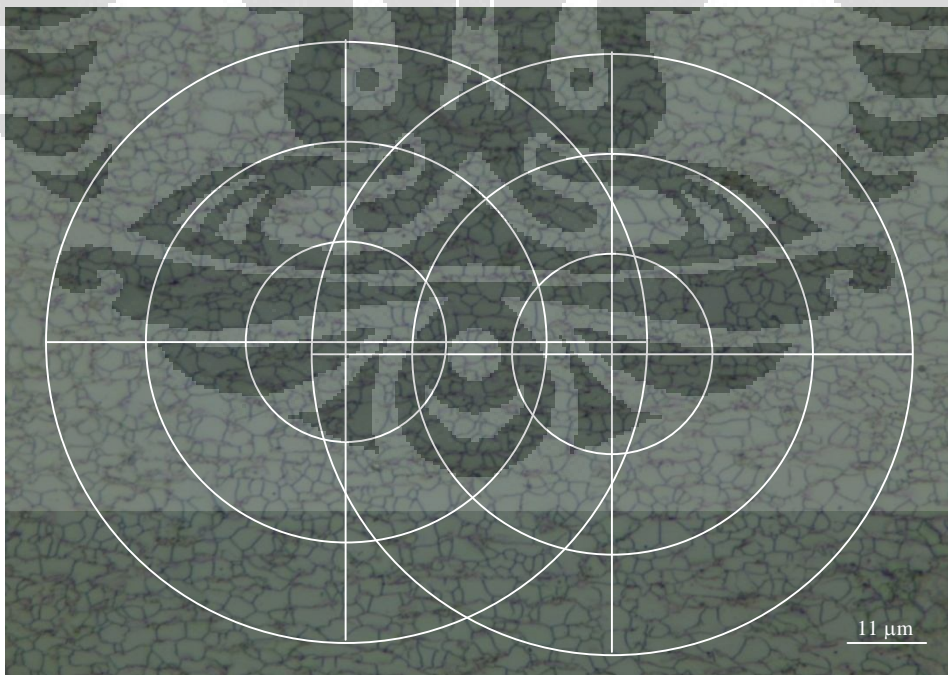
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $122 + 79 + 42 = 243$, lingkaran 2 = $111 + 77 + 46 = 234$

Rata-rata perpotongan = $(243 + 234)/2 = 238,5$ titik potong

8.

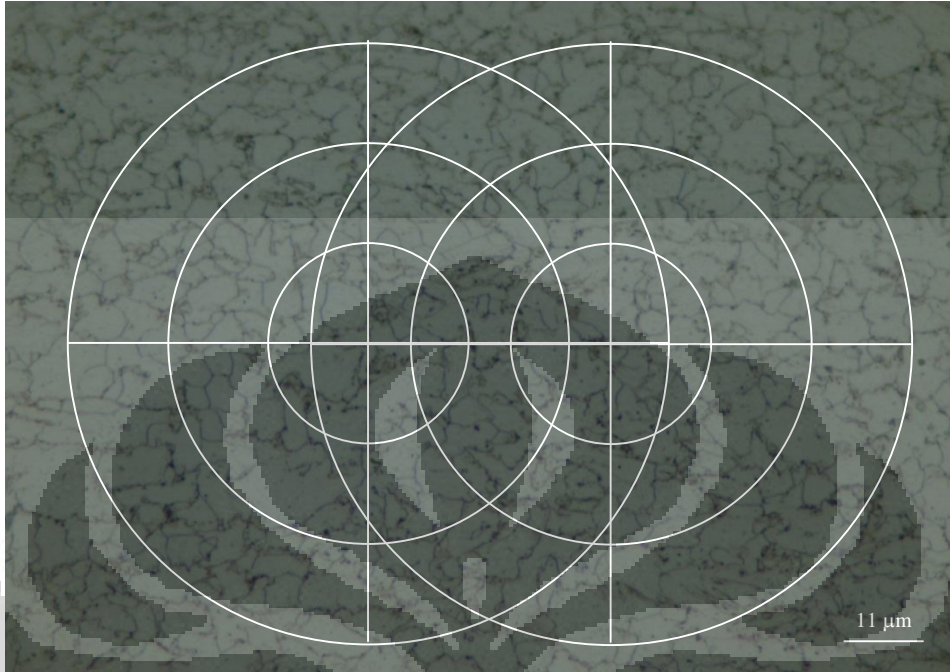


Perpotongan lingkaran 1 = $122 + 78 + 39 = 239$, lingkaran 2 = $102 + 78 + 40 = 220$

Rata-rata perpotongan = $(239 + 220)/2 = 229,5$ titik potong

Sampel Tidak Dicanai ($4,388 \pm 0,073 \mu\text{m}$)

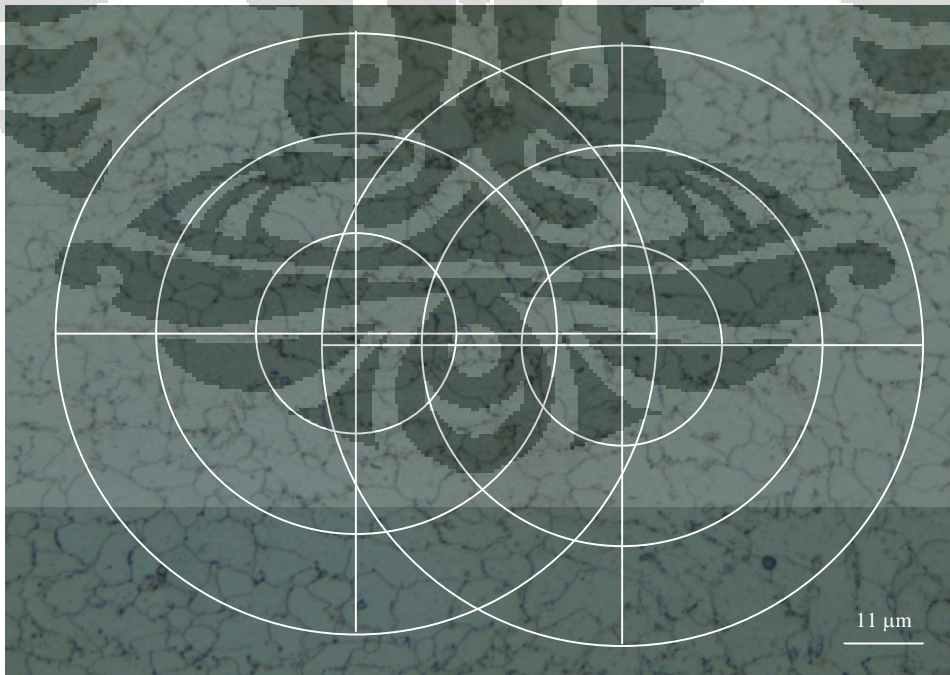
1.



Perpotongan lingkaran 1 = $66 + 40 + 19 = 125$, lingkaran 2 = $64 + 49 + 20 = 133$

Rata-rata perpotongan = $(125 + 133)/2 = 129$ titik potong

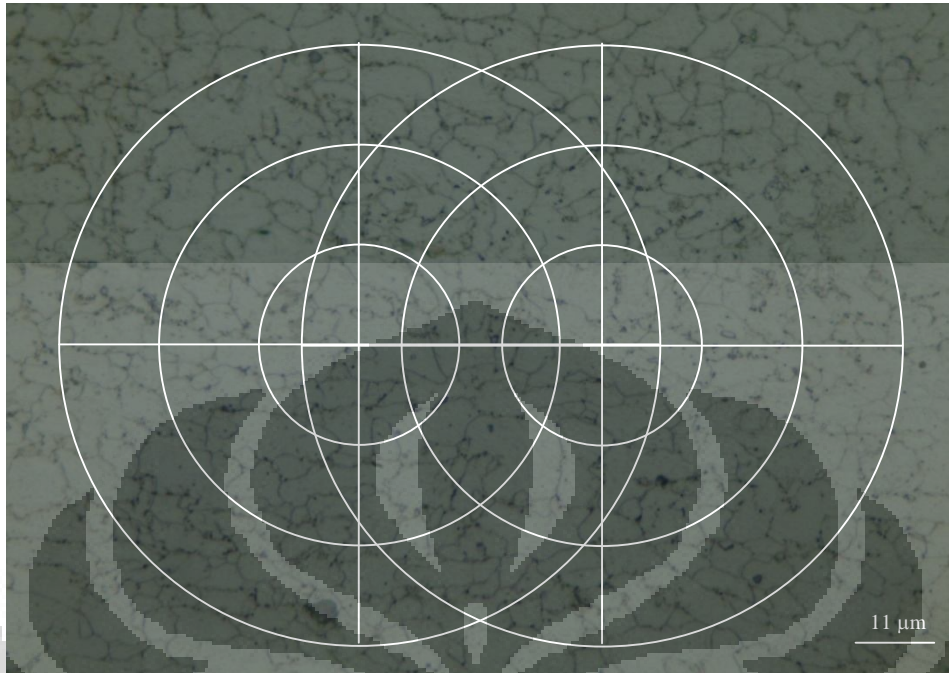
2.



Perpotongan lingkaran 1 = $51 + 35 + 20 = 106$, lingkaran 2 = $49 + 40 + 18 = 107$

Rata-rata perpotongan = $(106 + 107)/2 = 106,5$ titik potong

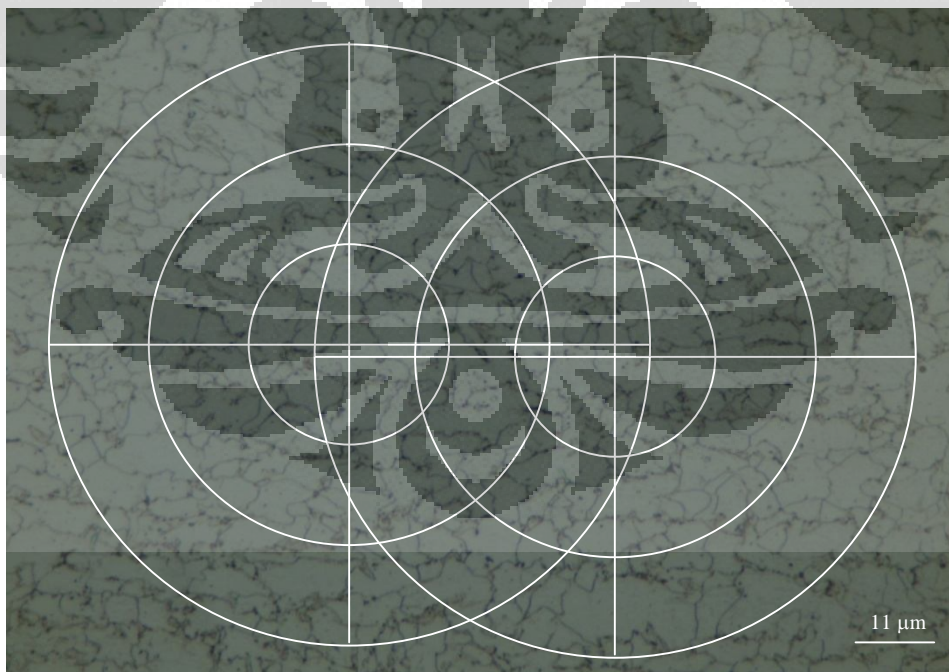
3.



Perpotongan lingkaran 1 = $58 + 34 + 17 = 109$, lingkaran 2 = $56 + 43 + 20 = 119$

Rata-rata perpotongan = $(109 + 119)/2 = 114$ titik potong

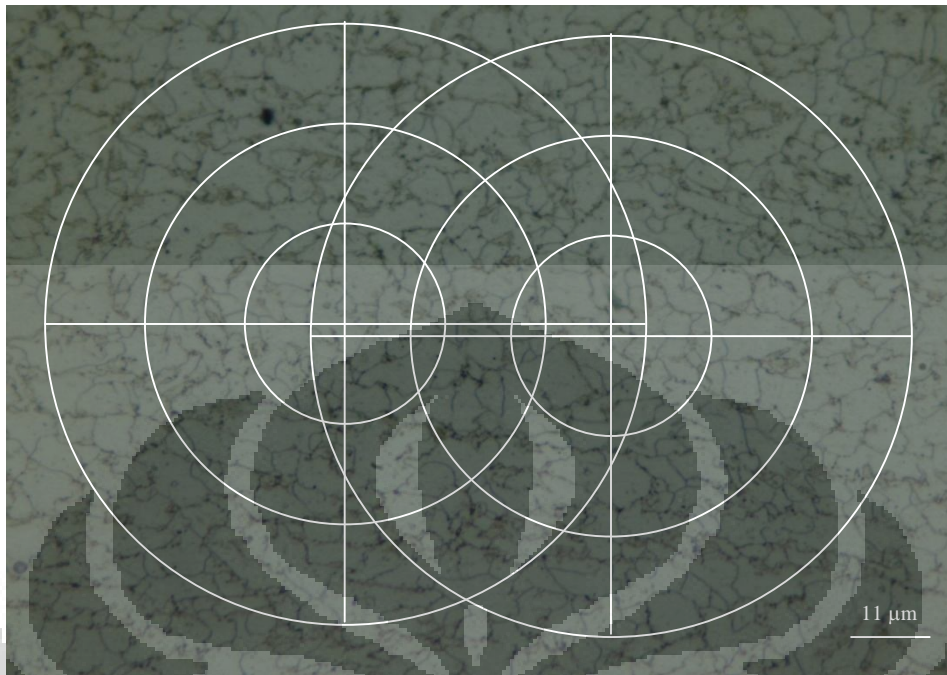
4.



Perpotongan lingkaran 1 = $67 + 45 + 22 = 134$, lingkaran 2 = $60 + 45 + 21 = 126$

Rata-rata perpotongan = $(134 + 126)/2 = 130$ titik potong

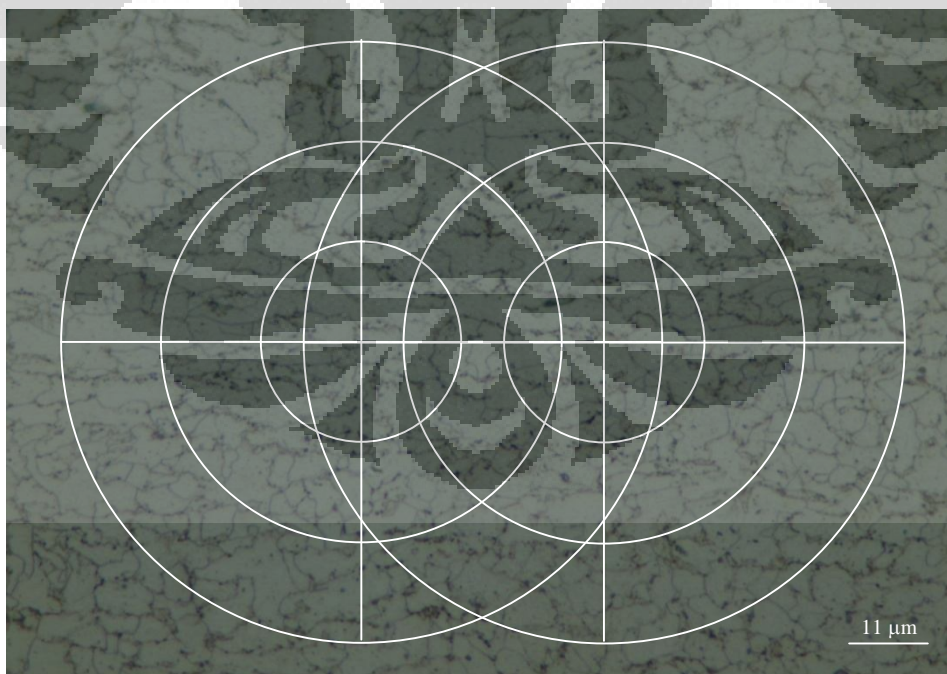
5.



Perpotongan lingkaran 1 = $67 + 41 + 21 = 129$, lingkaran 2 = $64 + 47 + 20 = 131$

Rata-rata perpotongan = $(129 + 131)/2 = 130$ titik potong

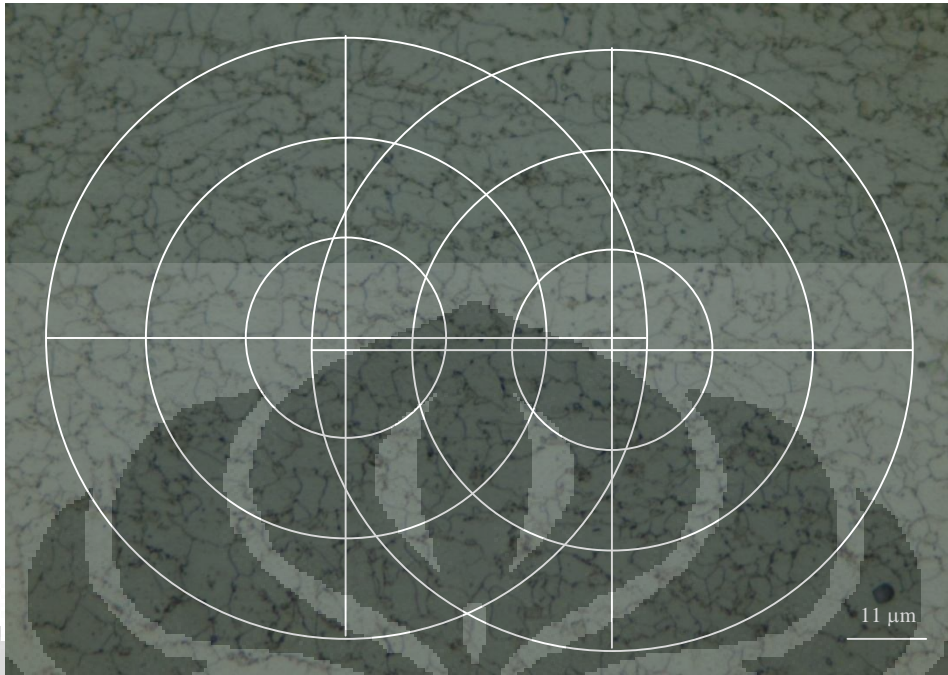
6.



Perpotongan lingkaran 1 = $68 + 46 + 22 = 136$, lingkaran 2 = $62 + 38 + 22 = 122$

Rata-rata perpotongan = $(136 + 122)/2 = 129$ titik potong

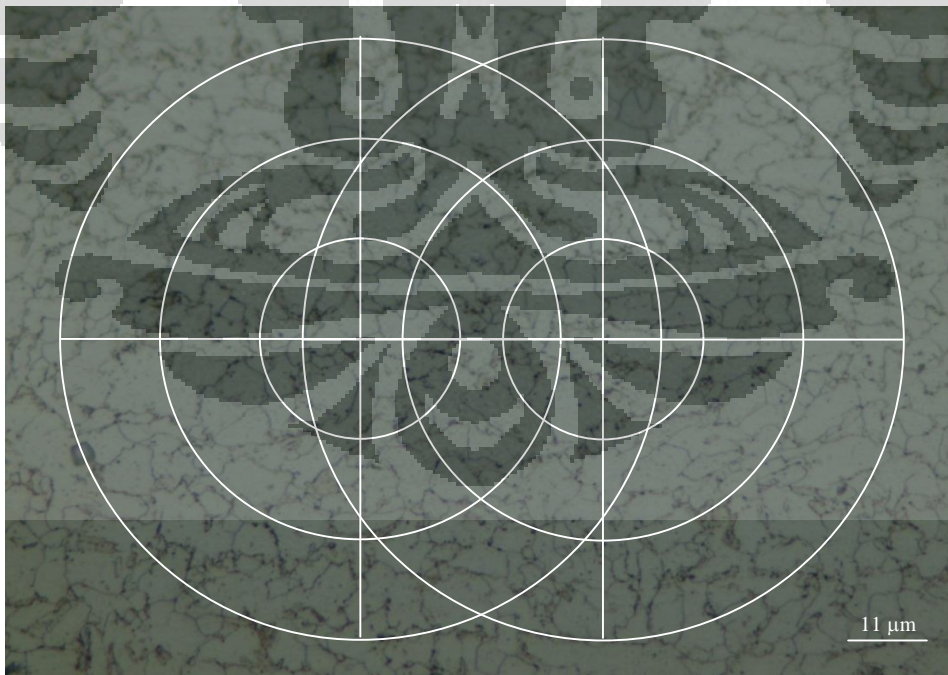
7.



Perpotongan lingkaran 1 = $65 + 41 + 20 = 126$, lingkaran 2 = $57 + 45 + 21 = 123$

Rata-rata perpotongan = $(126 + 123)/2 = 124,5$ titik potong

8.



Perpotongan lingkaran 1 = $61 + 38 + 20 = 119$, lingkaran 2 = $57 + 40 + 19 = 116$

Rata-rata perpotongan = $(119 + 116)/2 = 117,5$ titik potong

Sampel 2 Titik 1

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	190	0,00263	13,852	2,97268	2,97405	0,00138	0,00000
2	185	0,0027	13,775	3,05340		-0,07935	0,00630
3	186,5	0,00268	13,798	3,02868		-0,05463	0,00298
4	186,5	0,00268	13,798	3,02868		-0,05463	0,00298
5	192,5	0,0026	13,890	2,93405		0,04000	0,00160
6	193	0,00259	13,897	2,92645		0,04760	0,00227
7	197,5	0,00253	13,964	2,86002		0,11403	0,01300
8	189	0,00265	13,837	2,98844		-0,01439	0,00021

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,02934$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,06475 \mu\text{m}$$

Sampel 2 Titik 2

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	221	0,00226	14,288	2,56092	2,53826	-0,02266	0,00051
2	223,5	0,00224	14,321	2,53312		0,00514	0,00003
3	216,5	0,00231	14,229	2,61271		-0,07446	0,00554
4	232,5	0,00215	14,435	2,43840		0,09986	0,00997
5	224,5	0,00223	14,334	2,52219		0,01607	0,00026
6	219,5	0,00228	14,269	2,57793		-0,03967	0,00157
7	224,5	0,00223	14,334	2,52219		0,01607	0,00026
8	223	0,00224	14,314	2,53862		-0,00036	0,00000

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,01815$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,05091 \mu\text{m}$$

Sampel 2 Titik 3 (Gambar 1, 2, dan 7 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
3	237	0,00211	14,490	2,39395	2,42342	0,02947	0,00087
4	253,5	0,00197	14,684	2,24545		0,17797	0,03167
5	211	0,00237	14,155	2,67930		-0,25588	0,06548
6	233,5	0,00214	14,447	2,42836		-0,00494	0,00002
8	239,5	0,00209	14,520	2,37003		0,05339	0,00285

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,10089$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,15882 \mu\text{m}$$

Sampel 2 Titik 4

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	278,5	0,0018	14,955	2,05612	2,05704	0,00092	0,00000
2	286,5	0,00175	15,037	2,00293		0,05411	0,00293
3	278	0,0018	14,950	2,05955		-0,00251	0,00001
4	272	0,00184	14,887	2,10178		-0,04474	0,00200
5	276,5	0,00181	14,935	2,06993		-0,01289	0,00017
6	280,5	0,00178	14,976	2,04252		0,01452	0,00021
7	282	0,00177	14,991	2,03245		0,02459	0,00060
8	273,5	0,00183	14,903	2,09104		-0,03400	0,00116

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,00707$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,03179 \mu\text{m}$$

Sampel 4 Titik 1

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	239	0,00209	14,5141	2,37477	2,41459	0,03982	0,00159
2	226,5	0,00221	14,3591	2,50064		-0,08605	0,00740
3	243	0,00206	14,562	2,33744		0,07715	0,00595
4	236	0,00212	14,4777	2,40367		0,01092	0,00012
5	233,5	0,00214	14,4469	2,42836		-0,01377	0,00019
6	239	0,00209	14,5141	2,37477		0,03982	0,00159
7	232	0,00216	14,4283	2,44345		-0,02886	0,00083
8	231	0,00216	14,4159	2,45363		-0,03904	0,00152

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,01919$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,05236 \mu\text{m}$$

Sampel 4 Titik 2

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	240,5	0,00208	14,5322	2,36062	2,27758	-0,08303	0,00689
2	243	0,00206	14,562	2,33744		-0,05986	0,00358
3	264,5	0,00189	14,8066	2,15744		0,12014	0,01443
4	256,5	0,00195	14,718	2,22065		0,05693	0,00324
5	251	0,00199	14,6555	2,2666		0,01098	0,00012
6	246,5	0,00203	14,6033	2,30584		-0,02826	0,00080
7	249	0,00201	14,6324	2,28385		-0,00627	0,00004
8	248,5	0,00201	14,6266	2,28821		-0,01063	0,00011

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,02922$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,06461 \mu\text{m}$$

Sampel 4 Titik 3

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	243,5	0,00205	14,5679	2,33287	2,17988	-0,15299	0,02340
2	241,5	0,00207	14,5441	2,35128		-0,17140	0,02938
3	254,5	0,00196	14,6954	2,23711		-0,05723	0,00328
4	271	0,00185	14,8767	2,10901		0,07086	0,00502
5	281,5	0,00178	14,9864	2,03579		0,14408	0,02076
6	275,5	0,00181	14,9242	2,07691		0,10297	0,01060
7	267,5	0,00187	14,8392	2,13478		0,04510	0,00203
8	264	0,00189	14,8012	2,16127		0,01861	0,00035

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,09482$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,11639 \mu\text{m}$$

Sampel 4 Titik 4

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	279	0,00179	14,9606	2,0527	1,90546	-0,14723	0,02168
2	304	0,00164	15,2083	1,89685		0,00861	0,00007
3	307	0,00163	15,2366	1,87994		0,02552	0,00065
4	302,5	0,00165	15,194	1,90544		0,00003	0,00000
5	308,5	0,00162	15,2507	1,87162		0,03384	0,00115
6	309	0,00162	15,2553	1,86886		0,03660	0,00134
7	307	0,00163	15,2366	1,87994		0,02552	0,00065
8	305,5	0,00164	15,2225	1,88835		0,01711	0,00029

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,02583$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,06075 \mu\text{m}$$

Sampel 5 Titik 1 (Gambar 5, 7, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	225	0,00222	14,3399	2,51676	2,4646	-0,05216	0,002721
2	236	0,00212	14,4777	2,40367		0,06093	0,003713
3	231	0,00216	14,4159	2,45363		0,01097	0,00012
4	231	0,00216	14,4159	2,45363		0,01097	0,00012
6	227	0,0022	14,3655	2,49531		-0,03071	0,000943

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,07678$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,043639 \mu\text{m}$$

Sampel 5 Titik 2 (Gambar 1, 2, dan 7 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
3	244	0,00205	14,5739	2,32831	2,19592	-0,1324	0,017528
4	257,5	0,00194	14,7292	2,21252		-0,0166	0,000276
5	260	0,00192	14,7571	2,19248		0,00343	0,000012
6	276	0,00181	14,9294	2,07341		0,12251	0,015008
8	262,5	0,0019	14,7847	2,17286		0,02306	0,000532

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,033355$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,091317 \mu\text{m}$$

Sampel 5 Titik 3 (Gambar 3, 4, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	296	0,00169	15,1313	1,9437	2,07892	0,13522	0,018285
2	286,5	0,00175	15,0372	2,00293		-0,076	0,005776
5	272,5	0,00183	14,8926	2,09819		-0,01926	0,000371
6	260,5	0,00192	14,7627	2,18853		-0,1096	0,012013
7	264	0,00189	14,8012	2,16127		-0,08235	0,006782

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,043226$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,103954 \mu\text{m}$$

Sampel 5 Titik 4 (Gambar 4, 6, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	302,5	0,00165	15,194	1,90544	1,89469	-0,01075	0,000116
2	314,5	0,00159	15,3062	1,83915		0,05553	0,003084
3	323	0,00155	15,3832	1,79532		0,09937	0,009873
5	295	0,00169	15,1215	1,94975		-0,05506	0,003031
7	289,5	0,00173	15,0672	1,98378		-0,08909	0,007937

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,024042$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,077527 \mu\text{m}$$

Sampel 7 Titik 1

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	178	0,00281	13,6638	3,17491	3,0206	-0,15431	0,02381
2	198	0,00253	13,9711	2,85284		0,16775	0,02814
3	199	0,00251	13,9856	2,83861		0,18199	0,03312
4	186	0,00269	13,7907	3,03687		-0,01628	0,00026
5	176	0,00284	13,6312	3,2116		-0,191	0,03648
6	190	0,00263	13,8521	2,97268		0,04792	0,0023
7	204	0,00245	14,0572	2,76973		0,25086	0,06293
8	171	0,00292	13,5481	3,30754		-0,28694	0,08233

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,269384$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,196172 \mu\text{m}$$

Sampel 7 Titik 2 (Gambar 1, 2, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
3	205	0,00244	14,0713	2,7564	2,77511	0,01871	0,00035
4	205	0,00244	14,0713	2,7564		0,01871	0,00035
5	195,5	0,00256	13,9344	2,88913		-0,11402	0,013
6	205	0,00244	14,0713	2,7564		0,01871	0,00035
7	208	0,0024	14,1133	2,71724		0,05787	0,00335

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,0174$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,065954 \mu\text{m}$$

Sampel 7 Titik 3 (Gambar 1, 2, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
3	201	0,00249	14,0145	2,81061	2,76782	-0,04279	0,00183
4	212	0,00236	14,1682	2,66691		0,10091	0,01018
5	201	0,00249	14,0145	2,81061		-0,04279	0,00183
6	209,5	0,00239	14,134	2,69812		0,0697	0,00486
7	198	0,00253	13,9711	2,85284		-0,08502	0,00723

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,025931$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,080515 \mu\text{m}$$

Sampel 7 Titik 4

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	231,5	0,00216	14,4221	2,44853	2,53382	0,08529	0,00727
2	223	0,00224	14,3142	2,53862		-0,0048	2,3E-05
3	207	0,00242	14,0994	2,73016		-0,19633	0,03855
4	214,5	0,00233	14,202	2,6365		-0,10268	0,01054
5	209,5	0,00239	14,134	2,69812		-0,1643	0,02699
6	239,5	0,00209	14,5201	2,37003		0,16379	0,02683
7	238,5	0,0021	14,5081	2,37953		0,15429	0,0238
8	229,5	0,00218	14,3971	2,46908		0,06474	0,00419

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,138205$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/8-1)^{0,5} = 0,140512 \mu\text{m}$$

Sampel Tidak Dicanai (Gambar 2, 3, dan 8 tidak dimasukkan dalam perhitungan)

gambar ke-	P	l	G	d (mm)	d_{avg} (mm)	$d_{avg}-d_i$	$(d_{avg}-d_i)^2$
1	129	0,00388	12,735	4,37100	4,38752	0,01652	0,00027
4	130	0,00385	12,757	4,34020		0,04732	0,00224
5	130	0,00385	12,757	4,34020		0,04732	0,00224
6	129	0,00388	12,735	4,37100		0,01652	0,00027
7	124,5	0,00402	12,632	4,51520		-0,12768	0,01630

$$\Sigma(d-d_i)^2 = 0,02133$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(d-d_i)^2/5-1)^{0,5} = 0,07302 \mu\text{m}$$

Lampiran 2. Perhitungan Kekerasan Vickers

Sampel 2 Titik 1

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
56	56	56	177,360	178,023	0,663	0,440
55	58	56,5	174,234		3,789	14,353
56	56	56	177,360		0,663	0,440
54,5	57	55,75	178,954		-0,931	0,866
56,5	54	55,25	182,208		-4,184	17,510

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 33,610$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,899 \text{ HVN}$$

Sampel 2 Titik 2

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
53	56,5	54,75	185,551	190,181	4,630	21,436
53,5	57	55,25	182,208		7,973	63,570
52,5	53,5	53	198,006		-7,826	61,243
53	55,5	54,25	188,987		1,194	1,425
53	53,5	53,25	196,152		-5,971	35,652

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 183,325$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 6,770 \text{ HVN}$$

Sampel 2 Titik 3

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
51	53,5	52,25	203,732	198,802	-4,930	24,305
53	53,5	53,25	196,152		2,650	7,023
54	53	53,5	194,323		4,479	20,061
51	54	52,5	201,796		-2,994	8,966
52	54	53	198,006		0,795	0,632

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 60,987$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 3,905 \text{ HVN}$$

Sampel 2 Titik 4

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
52,5	52,5	52,5	201,796	200,678	-1,118	1,249
52,5	53	52,75	199,888		0,791	0,625
53	53	53	198,006		2,672	7,139
52	52	52	205,695		-5,017	25,170
52,5	53,5	53	198,006		2,672	7,139

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 41,322$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 3,214 \text{ HVN}$$

Sampel 4 Titik 1

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
55	55	55	183,868	182,925	-0,943	0,889
56	56,5	56,25	175,787		7,138	50,952
54	55,5	54,75	185,551		-2,626	6,896
54	56	55	183,868		-0,943	0,889
54,5	55	54,75	185,551		-2,626	6,896

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 66,523$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 4,078 \text{ HVN}$$

Sampel 4 Titik 2

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
53	56	54,5	187,257	185,993	-1,264	1,597
53,5	56,5	55	183,868		2,125	4,517
53,5	54,5	54	190,741		-4,748	22,539
55,5	56,5	56	177,360		8,633	74,537
54	54	54	190,741		-4,748	22,539

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 125,730$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 5,606 \text{ HVN}$$

Sampel 4 Titik 3

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
54	54	54	190,741	190,107	-0,633	0,401
52	54,5	53,25	196,152		-6,044	36,534
54	56	55	183,868		6,239	38,931
52	55,5	53,75	192,519		-2,412	5,818
53,5	55,5	54,5	187,257		2,850	8,124

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 89,808$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 4,738 \text{ HVN}$$

Sampel 4 Titik 4

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
51,5	54,5	53	198,006	197,264	-0,742	0,550
52	54,5	53,25	196,152		1,113	1,239
52	54	53	198,006		-0,742	0,550
52	54,5	53,25	196,152		1,113	1,239
52	54	53	198,006		-0,742	0,550

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 4,129$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 1,016 \text{ HVN}$$

Sampel 5 Titik 1

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
54	54,5	54,25	188,987	197,337	8,350	69,720
53	53	53	198,006		-0,670	0,449
52	53	52,5	201,796		-4,459	19,885
53	52,5	52,75	199,888		-2,551	6,508
53	53	53	198,006		-0,670	0,449

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 97,010$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 4,925 \text{ HVN}$$

Sampel 5 Titik 2

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
52,5	52,5	52,5	201,796	201,054	-0,742	0,550
52,5	52,5	52,5	201,796		-0,742	0,550
52,5	52,5	52,5	201,796		-0,742	0,550
52	52,5	52,25	203,732		-2,677	7,169
53	53,5	53,25	196,152		4,903	24,036

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 32,855$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,866 \text{ HVN}$$

Sampel 5 Titik 3

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
51,5	52	51,75	207,687	204,921	-2,766	7,653
52,5	52,5	52,5	201,796		3,125	9,767
51,5	52,5	52	205,695		-0,774	0,599
52,5	52	52,25	203,732		1,190	1,415
51,5	52,5	52	205,695		-0,774	0,599

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 20,033$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,238 \text{ HVN}$$

Sampel 5 Titik 4

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
51,5	52,5	52	205,695	207,711	2,016	4,063
51,5	52,5	52	205,695		2,016	4,063
50,5	53,5	52	205,695		2,016	4,063
51	51,5	51,25	211,760		-4,049	16,393
51,5	51,5	51,5	209,709		-1,998	3,992

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 32,572$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,856 \text{ HVN}$$

Sampel 7 Titik 1

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
55	56	55,5	180,570	175,514	-5,056	25,563
56	58	57	171,191		4,323	18,685
55,5	57	56,25	175,787		-0,273	0,074
56	56,5	56,25	175,787		-0,273	0,074
55	58	56,5	174,234		1,279	1,637

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 46,034$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 3,392 \text{ HVN}$$

Sampel 7 Titik 2

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
55,5	56,5	56	177,360	180,919	3,560	12,671
54,5	56	55,25	182,208		-1,288	1,660
54	56,5	55,25	182,208		-1,288	1,660
54	56	55	183,868		-2,948	8,693
55	56,5	55,75	178,954		1,965	3,863

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 28,546$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,671 \text{ HVN}$$

Sampel 7 Titik 3

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
55	54,5	54,75	185,551	182,890	-2,661	7,081
54,5	56,5	55,5	180,570		2,320	5,382
54	56,5	55,25	182,208		0,682	0,465
54,5	55	54,75	185,551		-2,661	7,081
55,5	55,5	55,5	180,570		2,320	5,382

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 25,392$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 2,520 \text{ HVN}$$

Sampel 7 Titik 4

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
53	56,5	54,75	185,551	189,395	3,844	14,780
52,5	55	53,75	192,519		-3,124	9,759
54	56	55	183,868		5,527	30,553
54	53,5	53,75	192,519		-3,124	9,759
52,5	55	53,75	192,519		-3,124	9,759

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 74,610$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 4,319 \text{ HVN}$$

Sampel Tidak Dicanai

d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{avg} (mm)	HVN	HVN_{avg}	$HVN_{avg} - HVN_i$	$(HVN_{avg} - HVN_i)^2$
57,5	59	58,25	163,923	157,450	-6,472	41,891
61	60	60,5	151,957		5,494	30,179
59	59,5	59,25	158,436		-0,986	0,972
59	59,5	59,25	158,436		-0,986	0,972
60	60	60	154,500		2,950	8,705

$$\Sigma(HVN-HVN_i)^2 = 82,718$$

$$\text{simpangan baku} = (\Sigma(HVN-HVN_i)^2/5-1)^{0,5} = 4,547 \text{ HVN}$$