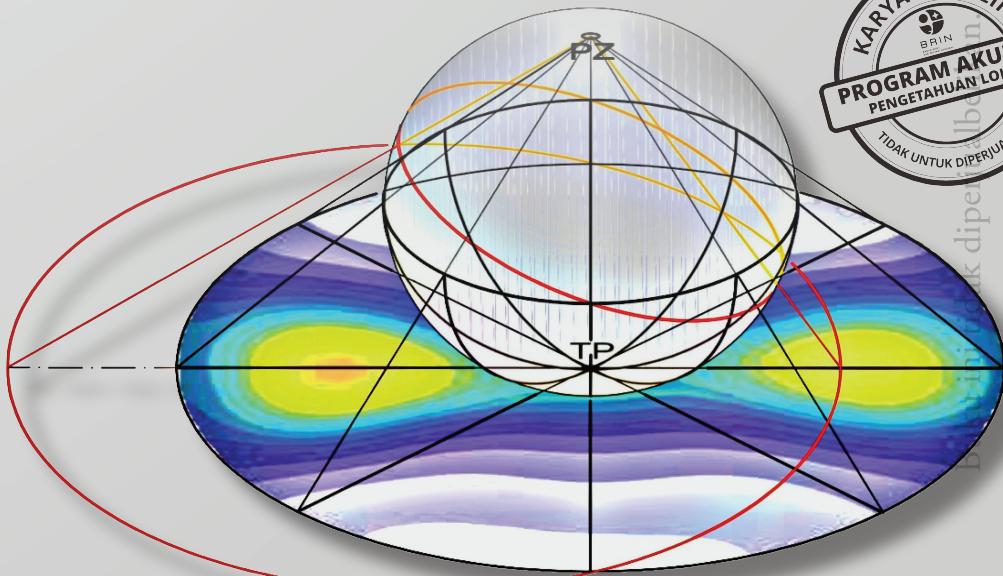


# PENGANTAR TEKSTUR KRISTALOGRAFI: TEORI DAN APLIKASI

Penulis:

Andika Widya Pramono dan Jenny Bouffette



# PENGANTAR TEKSTUR KRISTALOGRAFI: TEORI DAN APLIKASI



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

*All Rights Reserved*

# PENGANTAR TEKSTUR KRISTALOGRAFI: TEORI DAN APLIKASI

Penulis:

Andika Widya Pramono dan Jenny Bouffette



Lipi Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pengantar Tekstur Kristalografi Teori dan Aplikasi/Andika Wijaya Pramono dan Jenny Bouffette–Jakarta: LIPI Press, 2022.

xx hlm. + 145 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-496-279-1 (cetak)  
978-602-496-280-7 (e-book)

1. Tekstur Kristalografi  
3. Inverse Pole Figures

2. Pole Figures  
4. Fungsi Distribusi Orientasi

548

*Copy editor* : Heru Yulistian dan Risma Wahyu Hartiningsih  
*Proofreader* : Tantrina Dwi Aprianita dan Sonny Heru Kusuma  
Penata isi : Kurnia Trijaya Apriyani dan Rahma Hilma Taslima  
Desainer sampul : Meita Safitri

Cetakan pertama : Januari 2022

Diterbitkan oleh:



LIPI Press, anggota Ikapi  
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6  
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710  
Telp.: (021) 573 3465  
e-mail: press@mail.lipi.go.id  
website: lipipress.lipi.go.id  
 LIPI Press  
 @lipi\_press  
 lipi.press

Buku ini merupakan karya buku yang terpilih dalam Program Akuisisi  
Pengetahuan Lokal Direktorat Repozitori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah,  
Badan Riset dan Inovasi Nasional.



Karya ini dilisensikan di bawah Licensi  
Internasional Creative Commons  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Isi

Daftar Gambar .....	vii
Pengantar Penerbit .....	xvii
Kata Pengantar .....	xix
Prakata .....	xxi
BAB I Pendahuluan .....	1
BAB II Struktur Kristal Logam dan Paduan Beserta Observasinya Menggunakan Berkas Sinar-X, Berkas Neutron, dan Elektron Hamburan Balik .....	7
A. Solidifikasi pada Logam dan Paduan .....	7
B. Struktur Kristal Logam .....	10
C. Simetri Kristal .....	15
D. Indeks Miller Bidang dan Arah .....	21
E. Difraksi Sinar-X dan Berkas Neutron.....	31
F. Metode Laue.....	34
G. Elektron Hamburan Balik ( <i>Backscattered Electron</i> ) .....	35
H. Alat Observasi untuk Analisis Tekstur Kristalografi....	36

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB III	Proyeksi Stereografik, <i>Pole Figures</i> , dan <i>Inverse Pole Figures</i> .....	43
A.	Proyeksi Stereografik.....	43
B.	Pengukuran Sudut Antarkutub Bidang Menggunakan Jaring Wulff ( <i>Wulff Net</i> ).....	48
C.	Simetri Kristal pada Stereogram.....	50
D.	<i>Pole Figures</i> .....	53
E.	Komponen-Komponen Tekstur ( <i>Texture Components</i> ) .....	55
F.	<i>Inverse Pole Figure</i> .....	60
BAB IV	Fungsi Distribusi Orientasi/FDO ( <i>Orientation Distribution Function/ODF</i> ).....	67
A.	Sudut-Sudut Euler dan Ruang Euler ( <i>Euler Angles and Euler Space</i> ) .....	68
B.	Fungsi Distribusi Orientasi/FDO ( <i>Orientation Distribution Function/ODF</i> ) .....	75
C.	Komponen Tekstur pada Fungsi Distribusi Orientasi.	86
BAB V	Aplikasi Tekstur Kristalografi (Telaah Beberapa Kasus) ....	89
A.	Rekrystalisasi dan Tekstur Kristalografi pada Lembaran Paduan Aluminium AA4006 yang Diproduksi dengan Proses <i>Twin Roll Caster</i> dan <i>Direct Chill</i> (Souza dkk., 2012).....	90
B.	Tekstur Kristalografi dari Kapak Tembaga Prasejarah (Artioli & Dugnani, 2004) .....	96
C.	Analisis Tekstur Kristalografi dari Paduan Ti6Al4V Hasil Proses <i>Direct Metal Laser Sintering</i> (DMLS) (Muiruri dkk., 2020) .....	96
D.	Orientasi Tekstur dan Kristalografi Apatit Biologis (BAp) sebagai Indeks Baru untuk Mengkaji Struktur Mikro dan Fungsi Tulang yang Diregenerasi dengan Rekayasa Jaringan (Nakano dkk., 2012) .....	105
E.	Tekstur Kristalografi pada Baja Rol Panas (Raabe, 2003) .....	108
BAB VI	Penutup .....	115

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Referensi .....	117
Indeks .....	129
Biografi Penulis .....	141

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Gambar

<b>Gambar 1.</b>	Korelasi antara Struktur, Sifat, Pemrosesan, dan Performa Material dalam Ilmu dan Teknik Material .....	2
<b>Gambar 2.</b>	Variasi modulus Young (E) pada tembaga (Cu) kristal tunggal sebagai fungsi dari orientasi kristal. .....	4
<b>Gambar 3.</b>	Contoh representasi mikrotekstur paduan Mg-7Gd-5Y-1,2Nd-0,5Zr yang mengalami deformasi dengan laju regangan 1.000/detik dalam bentuk pemetaan orientasi serta pemetaan misorientasi batas butir. .....	5
<b>Gambar 4.</b>	Proses solidifikasi atau pemanasan logam yang ditandai dengan perubahan susunan atom dari tidak teratur (fasa cair) menjadi teratur (fasa padat). .....	9
<b>Gambar 5.</b>	Proses Solidifikasi .....	9
<b>Gambar 6.</b>	Pembentukan batas butir sebagai pertemuan beberapa butiran dengan orientasi kristal yang berbeda (misorientasi).....	9
<b>Gambar 7.</b>	Skema Batas Butir .....	10

Buku ini tidak diperjualbelikan.

<b>Gambar 8.</b>	Pola dan Struktur Kristal dari Sebuah Sel Satuan Kubus Pusat Ruang (BCC). ....	12
<b>Gambar 9.</b>	Pola dan Struktur Kristal dari Sebuah Sel Satuan Kubus Pusat Muka/Sisi (FCC).....	13
<b>Gambar 10.</b>	Pola penyusunan lapisan-lapisan atom secara ABCABC menghasilkan struktur kristal kubus pusat muka/sisi (FCC).....	14
<b>Gambar 11.</b>	Susunan atom-atom pada struktur HCP berpola ABABAB secara berulang. ....	15
<b>Gambar 12.</b>	Buah Mangga dengan Rotasi Lipat -1.....	18
<b>Gambar 13.</b>	Propeler Dua Bilah dengan Rotasi Lipat -2.....	18
<b>Gambar 14.</b>	Pisau Tiga Mata dengan Rotasi Lipat -3. ....	19
<b>Gambar 15.</b>	Propeler Empat Bilah dengan Rotasi Lipat -4. ....	19
<b>Gambar 16.</b>	Propeler Enam Bilah dengan Rotasi Lipat -6. ....	20
<b>Gambar 17.</b>	Sistem koordinat <i>Cartesian</i> tiga dimensi berkaidah tangan kanan dengan sumbu (+) dan (-). ....	22
<b>Gambar 18.</b>	Beberapa contoh bidang kristalografi pada sistem kristal kubik beserta indeks Miller-nya. Perhatikan posisi-posisi titik <i>origin</i> (O). ....	24
<b>Gambar 19.</b>	Sistem Koordinat pada Struktur Kristal HCP .....	26
<b>Gambar 20.</b>	Beberapa contoh bidang kristalografi pada sistem kristal HCP beserta indeks Miller-nya. ....	26
<b>Gambar 21.</b>	Penamaan Indeks Miller untuk Beberapa Contoh Arah atau Vektor Kristalografi .....	28
<b>Gambar 22.</b>	Contoh Indeks Miller-Bravais Arah Kristalografi pada Struktur HCP .....	30
<b>Gambar 23.</b>	Difraksi Sinar-X oleh Atom-Atom Kristal.....	32
<b>Gambar 24.</b>	Skema difraksi sinar-X oleh material berkristal tunggal, interaksi spesimen dengan sinar-X, perbaikan data, serta analisis struktur kristal. ....	34
<b>Gambar 25.</b>	Jenis Metode Laue .....	35
<b>Gambar 26.</b>	Mekanisme Terjadinya Elektron Hamburan Balik .....	36

Buku ini tidak diperjualbelikan.

<b>Gambar 27.</b>	Diagram Kutub Logaritmik Penampang Hamburan Elektron Elastis dari Atom Karbon (C) dan Emas (Au) .....	37
<b>Gambar 29.</b>	(a) <i>Goniometer XRD</i> lateral, dan (b) <i>goniometer XRD</i> vertikal .....	38
<b>Gambar 28.</b>	Ilustrasi skematis tentang sistem <i>goniometer XRD</i> lateral lima-lingkaran.....	38
<b>Gambar 30.</b>	Prinsip Kerja Detektor EBSD .....	40
<b>Gambar 31.</b>	Pola Kikuchi dari Silikon (Si) Kristal Tunggal .....	40
<b>Gambar 32.</b>	Mekanisme Terbentuknya Garis Kikuchi dan Pita Kikuchi .....	41
<b>Gambar 33.</b>	Spot Difraksi .....	41
<b>Gambar 34.</b>	Contoh Produk Detektor SEM-EBSD .....	42
<b>Gambar 35.</b>	Difraksi dan Bola Imajiner .....	44
<b>Gambar 36.</b>	Kristal isometrik beserta pola difraksinya di permukaan bola imajiner. ....	45
<b>Gambar 37.</b>	Proyeksi Pola Difraksi dari Permukaan Bola Belahan Utara/Atas ke Bidang Ekuator .....	46
<b>Gambar 38.</b>	Lingkaran Besar dan Lingkaran Kecil pada Bola Imajiner	47
<b>Gambar 39.</b>	<i>Stereogram</i> dengan Kutub Pusat 001 Hasil Proyeksi Stereografik .....	47
<b>Gambar 40.</b>	Sudut Dihedral $\phi$ antara Bidang (111) dan (200).....	48
<b>Gambar 41.</b>	Jaring Wulff.....	51
<b>Gambar 42.</b>	Tumpang-tindih jaring Wulff dengan <i>stereogram</i> untuk pengukuran sudut di antara dua kutub ( <i>poles</i> ). ...	51
<b>Gambar 43.</b>	Contoh Pengukuran Sudut antara Kutub 101 dan 011.	52
<b>Gambar 44.</b>	Simetri rotasi tepat ( <i>proper rotation</i> ) dan rotasi tidak tepat ( <i>improper rotation</i> atau <i>roto-inversion</i> ) dari kelompok bidang {100}, {110}, dan {111} pada <i>stereogram</i> 001. ....	52
<b>Gambar 45.</b>	<i>Stereogram</i> dari 32 Kelompok Titik Kristalografi.....	53

<b>Gambar 46.</b>	Stereogram 001 dan <i>pole figure</i> 001 dari makrotekstur <i>foil</i> uranium- $\alpha$ hasil difraksi hamburan neutron.....	54
<b>Gambar 47.</b>	Arah RD-TD-ND pada Spesimen .....	55
<b>Gambar 48.</b>	Difraktogram dari Nanopartikel Tembaga (Cu) .....	56
<b>Gambar 49.</b>	Komponen Tekstur <i>Cube</i> (Cb) .....	58
<b>Gambar 50.</b>	Komponen Tekstur <i>Goss</i> (G) .....	59
<b>Gambar 51.</b>	Komponen Tekstur <i>Brass</i> (B) .....	59
<b>Gambar 52.</b>	Segitiga <i>Inverse Pole Figure</i> yang Mewakili 48 Simetri Arah Lainnya.....	61
<b>Gambar 53.</b>	Ilustrasi Sumbu-Sumbu Spesimen .....	62
<b>Gambar 54.</b>	Sumbu ND berimpitan dengan arah [001] serta berkas elektron atau neutron datang ke sel satuan sejajar dengan sumbu ND-[001].....	62
<b>Gambar 55.</b>	Stereogram dari ND-[001] .....	63
<b>Gambar 56.</b>	<i>Inverse Pole Figures</i> .....	63
<b>Gambar 57.</b>	Perbandingan <i>inverse pole figures</i> dari bilet tembaga <i>ultra-fine grained</i> (UFG) pada tiga kondisi ( <i>regime</i> ) proses yang berbeda. .....	64
<b>Gambar 58.</b>	Pemetaan EBSD beserta <i>inverse pole figures</i> terkait dari paduan Mg-0.2Zn-0.3Ca-0.1Mn yang diekstrusi pada (a) 300°C, (b) 350°C, dan (c) 400°C. .....	65
<b>Gambar 59.</b>	Komponen-komponen tekstur <i>inverse pole figures</i> pada paduan Al-2%Mg yang dirol hasil simulasi dengan metode <i>quasi-Monte-Carlo</i> (MC).....	65
<b>Gambar 60.</b>	Sistem Referensi dan Korelasi antara Kc dan Ks.....	68
<b>Gambar 61.</b>	Sumbu-Sumbu Ortonormal pada Struktur HCP .....	70
<b>Gambar 62.</b>	Pembentukan sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ , $\Phi$ , $\varphi_2$ ) untuk rotasi sistem RD-TD-ND ke sistem [100]-[010]-[001]. .....	71
<b>Gambar 63.</b>	Pembentukan sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ , $\Phi$ , $\varphi_2$ ) untuk rotasi sistem x-y-z ke sistem x''-y''-z' . .....	71

<b>Gambar 64.</b>	Variasi ruang Euler berbasis (a) kaidah tangan kanan, dan (b) kaidah tangan kiri. ....	74
<b>Gambar 65.</b>	Kondisi <i>plane strain</i> pada bagian tengah benda rol/canai beserta simetrinya.....	75
<b>Gambar 66.</b>	Kondisi <i>shear</i> pada permukaan benda rol/canai beserta simetrinya.....	76
<b>Gambar 67.</b>	Elemen-elemen simetri dalam ruang Euler untuk simetri kristal kubik dan simetri spesimen ortonormal. ....	77
<b>Gambar 68.</b>	Sebanyak 16 orbit elektron tunggal dibentuk berbasis fungsi <i>generalized spherical harmonic</i> untuk empat bilangan kuantum (n) terkecil. ....	78
<b>Gambar 69.</b>	Keterkaitan Data di <i>Pole Figure</i> (PF) dengan Distribusi Orientasi (DO).....	79
<b>Gambar 70.</b>	Kutub [001] pada PF dengan komponen $\alpha$ dan $\beta$ yang setara dengan rotasi sebesar $\gamma$ pada FDO di ruang Euler terhadap arah [001] di PF tersebut. ....	80
<b>Gambar 71.</b>	Material polikristal dengan keberadaan volume per butir ( $V_i$ ) serta orientasi per butir ( $g_i$ ).....	81
<b>Gambar 72.</b>	Pemetaan pada Ruang Euler .....	82
<b>Gambar 73.</b>	Lapisan-Lapisan atau Irisan-Irisan Citra Hasil <i>CT Scan</i>	83
<b>Gambar 74.</b>	FDO tekstur canai/rol dari (a) tembaga (Cu) murni dan (b) kuningan (Cu-37%Zn). ....	83
<b>Gambar 75.</b>	Contoh FDO dari Paduan Aluminium (Al) yang Ditarik-Kawat ( <i>wire-drawn</i> ) .....	84
<b>Gambar 76.</b>	Dampak dari <i>truncation error</i> pada FDO yang berkurang dengan peningkatan intensitas maksimum ( $I_{\max}$ ), dari (a) $I_{\max} = 16,7$ ; (b) $I_{\max} = 35,1$ ; dan (c) $I_{\max} = 43,5$ . ....	85
<b>Gambar 77.</b>	Dampak <i>Ghost Error</i> dari Tekstur Canai/Rol Paduan Al-Fe-Si pada FDO .....	85
<b>Gambar 78.</b>	Beberapa orientasi ideal atau komponen tekstur dari material berstruktur kubik.....	87

<b>Gambar 79.</b>	Tekstur khas yang muncul pada $\varphi_2 = 45^\circ$ dari baja listrik.....	88
<b>Gambar 80.</b>	Tekstur FDO pada pada $\varphi_2 = 45^\circ$ dari baja listrik, untuk kondisi pemrosesan: (a) rol dingin, (b) rol panas 17%, (c) rol panas 40%, serta (d) rol panas 55%.....	88
<b>Gambar 81.</b>	<i>Pole figure</i> (PF) dan FDO dari permukaan ( <i>surface</i> ) serta bagian tengah ( <i>center</i> ) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses TRC. ....	91
<b>Gambar 82.</b>	<i>Pole figure</i> (PF) dan FDO dari permukaan ( <i>surface</i> ) serta bagian tengah ( <i>center</i> ) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses DC. ....	92
<b>Gambar 83.</b>	<i>Pole figure</i> (111) dan FDO untuk sampel canai/rol 70% serta anil pada 400°C selama satu jam dari lembaran AA4006 TRC dan DC. ....	93
<b>Gambar 84.</b>	<i>Orientation imaging microscopy</i> (OIM) dari sampel lembaran AA4006 TRC yang telah dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam. ....	94
<b>Gambar 85.</b>	<i>Orientation imaging microscopy</i> (OIM) dari sampel lembaran AA4006 DC yang telah dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam. ....	95
<b>Gambar 86.</b>	Hasil uji kekerasan mikro serta observasi dengan mikroskop optik untuk lembaran TRC dan DC. ....	95
<b>Gambar 87.</b>	<i>Pole figure</i> (PF) dari kapak tembaga <i>Ötzi the Iceman</i> dengan struktur kristal yang <i>textureless</i> . ....	97
<b>Gambar 88.</b>	Perlakuan Panas Siklus 1.....	98
<b>Gambar 89.</b>	Perlakuan Panas Siklus 2.....	99
<b>Gambar 90.</b>	Struktur Mikro dan OIM dari Sampel.....	101
<b>Gambar 91.</b>	PF fasa $\alpha/\alpha'$ untuk sampel A yang tidak mengalami perlakuan panas. ....	102
<b>Gambar 92.</b>	PF fasa $\alpha/\alpha'$ untuk sampel B yang mengalami perlakuan panas Siklus 1.....	102
<b>Gambar 93.</b>	PF fasa $\alpha/\alpha'$ untuk sampel C yang mengalami perlakuan panas Siklus 2. ....	103

<b>Gambar 94.</b>	<i>Orientation Image Microscopy</i> (OIM) dari Fasa $\beta$ .....	104
<b>Gambar 95.</b>	PF (100), (110), dan (111) untuk Fasa $\beta$ .....	105
<b>Gambar 96.</b>	Variasi intensitas difraksi PF (002) pada tulang kortikal dari ulna kelinci empat minggu setelah operasi. ....	107
<b>Gambar 97.</b>	Variasi distribusi relatif dari sumbu c BAp selama masa rekonstruksi dengan pelepasan bFGF terkontrol. ....	108
<b>Gambar 98.</b>	Ketidakhomogenan tekstur pada baja IF rol panas (Grup A) searah ND dari gulungan. ....	111
<b>Gambar 99.</b>	Ketidakhomogenan Tekstur pada Baja IF (Grup A) di Bidang Lembaran dari Gulungan Rol Panas .....	111
<b>Gambar 100.</b>	Contoh Tekstur Lemah dari Grup A .....	113
<b>Gambar 101.</b>	Contoh tekstur lemah dalam arah ND ( <i>through-thickness</i> ) dari baja tahan karat austenitik (Grup A), hasil proses <i>strip casting</i> , dicirikan dengan tekstur serat proses solidifikasi. ....	113

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman mendasar bagi para peneliti, perekayasa, akademisi, serta pelaku industri di bidang metalurgi material di Indonesia tentang tekstur kristalografi beserta cara pengukuran, analisis, dan implementasinya. Analisis dan kajian tekstur kristalografi diperlukan untuk mengetahui serta memahami anisotropi sifat suatu senyawa, material, produk, atau komponen sebagai hasil dari tahapan proses, manufaktur, atau sintesis.

Pada masa mendatang, pemahaman terhadap analisis tekstur kristalografi serta penggunaannya di bidang penelitian, perekayasaan, dunia pendidikan tinggi, serta industri di Indonesia diharapkan dapat meningkat.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Kata Pengantar

Bidang metalurgi dan material telah berkembang pesat di Indonesia dengan para pelaku utama peneliti, perekayasa, akademisi, serta industri. Ruang lingkup penelitian, pengembangan, pengkajian, serta penerapan (litbangjirap) serta pendidikan dan pelatihan (diklat) di bidang metalurgi dan material bervariasi yang mencakup energi, kesehatan, transportasi, infrastruktur, pertahanan dan keamanan, serta teknologi informasi dan komunikasi. Salah satu percabangan bidang metalurgi dan material yang belum banyak dipahami serta diimplementasikan secara luas di Indonesia adalah tekstur kristalografi. Seperti halnya difraksi sinar-X (XRD), tekstur kristalografi juga memanfaatkan berkas sinar-X untuk menganalisis orientasi kristal. Selain berkas sinar-X, tekstur kristalografi memanfaatkan berkas neutron serta elektron hamburan balik. Dengan analisis tekstur kristalografi, anistropi sifat dari suatu material dapat dipahami dengan baik, termasuk pengaruhnya terhadap performa material saat merespons faktor eksternal, seperti pembebanan, gelombang elektromagnetik, dan arus listrik.

Buku ini disusun untuk menjadi batu lompatan bagi para peneliti, perekayasa, akademisi, serta pelaku industri yang tidak memiliki

banyak waktu atau kesempatan untuk mempelajari tekstur kristalografi secara rinci dan mengaplikasikannya di litbang, industri manufaktur, ataupun pengujian. Aspek-aspek kunci dari tekstur kristalografi dibahas secara lugas tanpa harus berkutat terlalu dalam pada teori fundamental yang mendasarinya. Di akhir pembahasan, buku ini memberikan beberapa contoh aplikasi tekstur kristalografi di berbagai bidang untuk memberikan gambaran dan *sense* kepada para pembaca sehingga siap untuk mengimplementasikannya di bidang masing-masing.

Semoga buku ini bermanfaat dan menjadikan tekstur kristalografi bagian dari kemajuan iptek metalurgi dan material di Indonesia. Terima kasih atas perhatian Anda.

Oktober 2021

Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng

Pakar Nanoteknologi

Kepala Pusat Riset Metalurgi dan Material BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Prakata

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas tersusun dan terpublikasinya buku *Pengantar Tekstur Kristalografi: Teori dan Aplikasi* ini. Buku ini disusun pada tahun kedua pandemi global Covid-19. Kondisi pandemi ini merupakan tantangan tersendiri bagi kami tim penulis karena terbatasnya ruang gerak untuk berinteraksi secara langsung, mengingat adanya protokol kesehatan yang harus dijaga. Akan tetapi, syukur alhamdulillah, dengan kesungguhan ikhtiar dan doa, buku ini akhirnya dapat tersusun dengan baik.

Buku ini disusun dengan latar belakang masih minimnya pengetahuan, pemahaman, serta pemanfaatan tekstur kristalografi di Indonesia. Perguruan tinggi di Indonesia, sebagai pintu gerbang pertama untuk penyampaian ilmu pengetahuan dan teknologi tingkat lanjut, belum menekankan secara signifikan arti penting dan manfaat tekstur kristalografi kepada para mahasiswa. Dalam litbang performa logam dan paduan beserta teknik manufakturnya, para peneliti dan perekayasa masih banyak mengesampingkan investigasi dan analisis tekstur kristalografi dalam menjembatani sifat fisik, sifat mekanik, dan per-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

forma material. Dunia industri otomotif, manufaktur, energi, serta pertahanan dan keamanan belum banyak melirik tekstur kristalografi dalam menjaga atau meningkatkan kualitas material produk mereka, apalagi untuk mendukung solusi permasalahan kegagalan komponen.

Tujuan penulisan buku ini adalah memberi pemahaman secara efektif dan efisien kepada pembaca tentang tekstur kristalografi beserta aplikasinya serta menjadi pedoman tentang sistematika berpikir dalam mengkaji dan menganalisis problema tekstur kristalografi. Semoga buku ini bermanfaat serta dapat membuka cakrawala baru tentang tekstur kristalografi di Indonesia.

Terima kasih atas perhatian dan dukungan Anda.

Mei 2021  
Tim Penulis

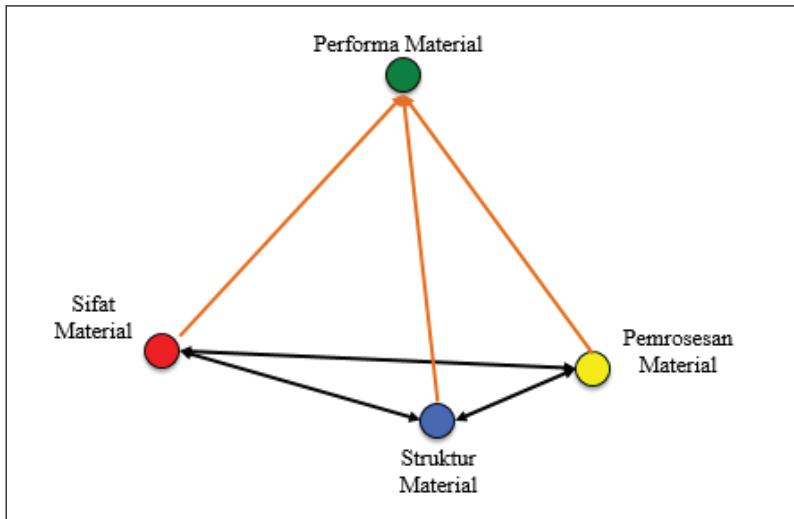
Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB I

## Pendahuluan

Ada tiga fondasi utama yang saling berkaitan serta memengaruhi performa material. Ketiga fondasi tersebut, yaitu (1) struktur material (*materials structure*), (2) sifat material (*materials properties*), dan (3) pemrosesan material (*materials processing*) (Callister & Rethwisch, 2018). Ilmu material (*materials science*) adalah ilmu yang mendalami korelasi antara struktur material dan sifat material. Sementara itu, teknik material (*materials engineering*) berbicara tentang desain dan/atau perekayasaan struktur material untuk menghasilkan sifat material baru atau lebih baik, yang ditentukan sebelumnya (*pre-determined*). Untuk bisa melakukan fungsinya tersebut, ilmu ataupun teknik material membutuhkan suatu atau rangkaian proses. Interaksi antara struktur, sifat, dan pemrosesan material ini menghasilkan material dengan performa tertentu. Gambar 1 memperlihatkan skema korelasi antara struktur, sifat, pemrosesan, serta performa material.

Pembahasan tentang aspek struktur material perlu memperhatikan skala ukurannya, yaitu dari tingkatan sub-atomik, atomik-molekul, mikroskopik, hingga makroskopik (dapat dilihat dengan mata). Yang



Sumber: Materials Science and Engineering (t.t.)

**Gambar 1.** Korelasi antara Struktur, Sifat, Pemrosesan, dan Performa Material dalam Ilmu dan Teknik Material

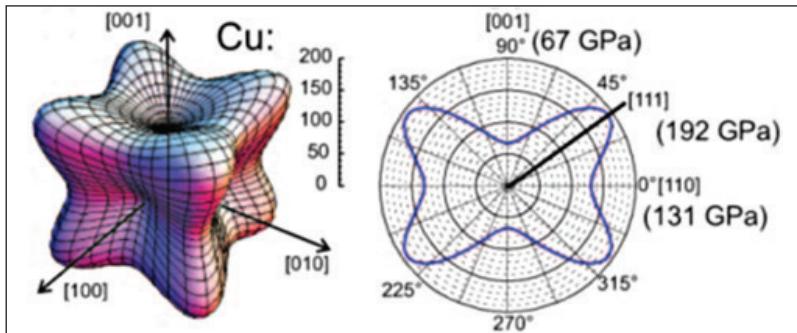
termasuk struktur material, yaitu struktur atom, elektron di kulit atom, struktur kristal logam dan paduan, rantai hidrokarbon, butir, batas butir, fasa kedua, inklusi, presipitat, porositas, serta retak.

Ada tiga kategori utama sifat material, yaitu sifat fisik, sifat kimiawi, dan sifat mekanik. Sifat fisik adalah kondisi fisik material yang dapat diukur dan diobservasi tanpa perubahan identitas atau komposisi material (Burgin, 2015). Yang termasuk dalam sifat fisik material adalah massa jenis, titik lebur, konduktivitas termal, tekstur kristalografi, konduktivitas listrik, ekspansi termal, dan ketahanan korosi. Sementara itu, sifat kimiawi adalah sifat yang terobservasi dan/atau terukur saat dan pascareaksi kimia, dengan perubahan identitas material (Masterton & Hurley, 2015). Yang termasuk ke dalam sifat kimiawi, contohnya panas pembakaran, entalpi pembentukan, keasaman dan kebasaan, toksisitas, sifat korosif, dan sebagainya. Ketika sifat fisik suatu material terobservasi/terukur akibat adanya beban eksternal pada material, berarti kita membicarakan tentang sifat mekanik material (Dieter, 1986). Sifat mekanik material meliputi kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan mulur.

Sebagai salah satu sifat fisik material, tekstur kristalografi memiliki kaitan erat dengan struktur kristal serta teknik pemrosesan (Gambar 1). Secara umum, logam dan paduan membentuk struktur kristal kubus pusat ruang (*body-centered cubic* [BCC]), kubus pusat muka (*face-centered cubic* [FCC]), serta *hexagonal close packed* (HCP) saat solidifikasi. Tekstur kristalografi adalah orientasi massal secara pilihan (*preferred*) dari struktur kristal akibat pemrosesan yang terjadi pada material polikristalin (Klosek, 2017). Tekstur jenis ini disebut juga makrotekstur. Pada makrotekstur, terjadi penyebaran tidak merata (*non-uniform distribution*) dari orientasi kristalografi pada material saat dan pasca-pemrosesan. Ketidakhomogenan orientasi kristal ini berdampak pada sifat material yang tidak merata (*anisotropic properties*). Gambar 2 memperlihatkan contoh variasi modulus elastisitas atau modulus Young (E) dari tembaga murni (Cu) kristal tunggal yang diplot terhadap arah kristalografi (Sander dkk., 2008). Nilai E terlihat lebih tinggi pada arah <111> dibandingkan arah <100>. Makrotekstur dianalisis dan disampaikan dalam bentuk *pole figures* (PF), *inverse pole figures* (IPF), dan fungsi distribusi orientasi FDO (*orientation distribution function*, ODF).

Selain makrotekstur ada yang dinamakan mikrotekstur, yaitu himpunan orientasi kristalografi yang komponennya terkait dengan lokasi masing-masing di dalam struktur mikro. Mikrotekstur bisa dianalisis dan disampaikan dalam bentuk *inverse pole figures* (IPF), pemetaan orientasi (*orientation mapping*), distribusi faktor Schmid, pemetaan misorientasi batas butir, dan seterusnya. Gambar 3 menunjukkan contoh representasi mikrotekstur paduan Mg-7Gd-5Y-1,2Nd-0,5Zr yang mengalami deformasi dengan laju regangan 1.000/detik dalam bentuk pemetaan orientasi serta pemetaan misorientasi batas butir (Tang dkk., 2020; Sander dkk., 2008).

Jenis pemrosesan yang berdampak pada pembentukan tekstur kristalografi adalah pemrosesan yang dapat mengubah orientasi kristal dari material. Jenis pemrosesan yang dimaksud meliputi pembentukan logam, perlakuan panas, perlakuan termomekanik, serta perilaku saat penggunaan (*in-service behavior*) (Bassani dkk., 2005). Model *visco-plastic-self-consistent* (VPSC) dapat digunakan untuk menganalisis



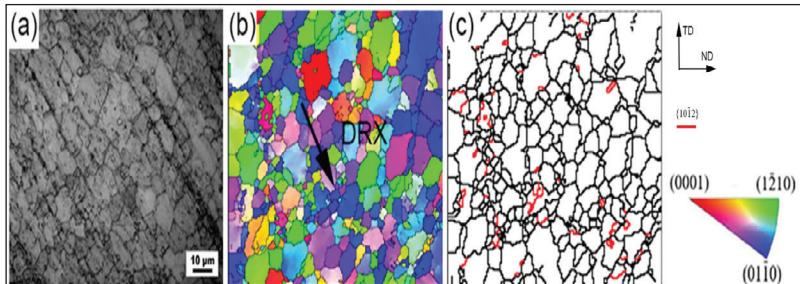
Sumber: Sander dkk. (2008)

**Gambar 2.** Variasi modulus Young ( $E$ ) pada tembaga (Cu) kristal tunggal sebagai fungsi dari orientasi kristal.

korelasi antara tekstur kristalografi dan sifat-sifat anisotropik dari logam atau paduan logam yang terdeformasi murni atau mengalami perlakuan termomekanik. Sifat-sifat anisotropik yang dimaksud adalah kekuatan luluh (*yield strength*), pengerasan kerja (*work hardening*), serta nilai-r yang merupakan rasio antara laju regangan *in-plane* dan laju regangan sepanjang ketebalan (Engler & An, 2005).

Di satu sisi, topik tekstur kristalografi di Indonesia belum terlalu populer dan pemanfaatannya baru sebatas riset dasar dengan luaran publikasi yang belum begitu banyak (Pramono, 2003; Pramono, 2013; Aniswatin dkk., 2013; Korda dkk., 2014; Aniswatin dkk., 2014; Bassani dkk., 2005; Priyanto dkk., 2015; Priyanto & Li, 2015; Basori dkk., 2018). Di sisi lain, fenomena cacat dan kegagalan material atau komponen di dunia industri masih kerap terjadi akibat pemrosesan secara mekanik ataupun termomekanik serta kondisi pembebahan saat pemakaian. Di luar negeri, seperti di Jerman, tekstur kristalografi sudah lama diminati dan banyak digunakan oleh industri-industri manufaktur dan otomotif. Tidak sedikit dari industri tersebut yang meminta jasa pengujian, analisis, serta konsultasi ke perguruan tinggi dan/atau lembaga penelitian perihal tekstur kristalografi produk mereka, dengan maksud meningkatkan sifat dan performa materialnya. Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman mendasar bagi para peneliti, perekarya, akademisi, serta pelaku industri di bidang metallurgi dan

material di Indonesia tentang tekstur kristalografi beserta cara pengukuran, analisis, dan implementasinya. Para mahasiswa yang membaca buku ini diharapkan telah mengambil mata kuliah Metalurgi Fisik atau Pengenalan Ilmu dan Teknik Material sehingga mengetahui istilah-istilah teknis yang digunakan serta lebih mudah memahami.



Ket.: (a) Struktur mikro dengan mikroskop optik dari paduan paduan Mg-7Gd-5Y-1,2Nd-0,5Zr yang mengalami deformasi dengan laju regangan 1.000/detik pada 20°C, (b) pemetaan orientasi dengan electron backscattering diffraction (EBSD) pada 20°C, serta (c) pemetaan misorientasi batas butir pada 20°C.

Sumber: Tang dkk. (2020)

**Gambar 3.** Contoh representasi mikrotekstur paduan Mg-7Gd-5Y-1,2Nd-0,5Zr yang mengalami deformasi dengan laju regangan 1.000/detik dalam bentuk pemetaan orientasi serta pemetaan misorientasi batas butir.

Tata saji dari buku ini dimulai dengan pendahuluan, dilanjutkan dengan pembahasan tentang struktur kristal beserta pengukuran dan analisisnya menggunakan sinar-X, berkas neutron, dan berkas elektron. Setelah itu, pembaca diberi bekal pengetahuan tentang proyeksi stereografik, yang diikuti dengan pembahasan mengenai *pole figures* dan *inverse pole figures*, sebagai dua jenis metode analisis tekstur kristalografi yang relatif sederhana. Pembahasan berlanjut ke topik fungsi distribusi orientasi/FDO (*orientation distribution function/ODF*) yang lebih kompleks dari *pole figures* dan *inverse pole figures* karena keberadaan parameter sudut-sudut dan ruang Euler (*Euler angles and space*) (Bunge, 1982; Engler & Randle, 2009). Di bagian akhir buku, pembaca diberi bekal beberapa contoh implementasi analisis tekstur kristalografi pada material dengan menggunakan *pole figures*, *inverse pole figures*, dan ODF.



# BAB II

## Struktur Kristal Logam dan Paduan Beserta Observasinya Menggunakan Berkas Sinar-X, Berkas Neutron, dan Elektron Hamburan Balik

Nomenklatur-nomenklatur tentang struktur kristal logam dan paduan pada buku ini ditulis dengan asumsi bahwa pembaca telah mendapat pengetahuan dasar metalurgi fisik, termasuk struktur dan ikatan atom. Oleh karena itu, pembahasan pada Bab 2 ini dimulai ketika atom-atom logam yang telah berikatan membentuk struktur kristal logam, atau dengan kata lain, dari skala nanometer ke mikrometer.

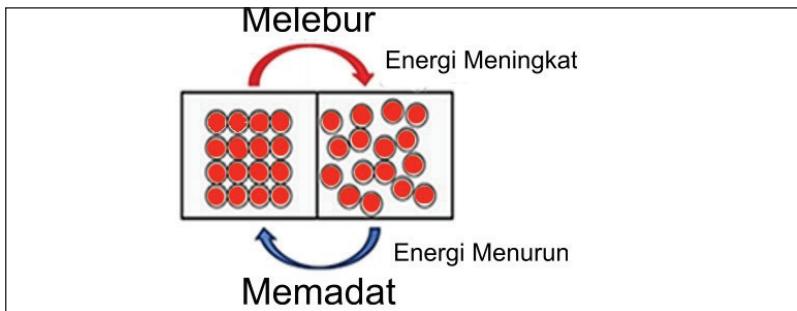
### A. Solidifikasi pada Logam dan Paduan

Pada fasa gas, partikel-partikel (atom-atom atau molekul-molekul elemental) bergerak sangat bebas. Yang membedakan gas dengan cairan/fluida dan padatan adalah terpisah atau berjaraknya partikel-partikel gas yang bergerak tersebut, ketika interaksi medan gravitasi ataupun listrik di antara partikel-partikel tersebut dapat diabaikan. Seiring dengan penurunan suhu, mobilitas partikel-partikel tersebut berkurang. Partikel-partikel yang bergetar (*vibrating particles*) tersebut kemudian bertautan untuk membentuk ikatan antarpartikel atau molekul dalam fasa cair melalui proses kondensasi. Cairan atau fluida memiliki

karakteristik dapat mengalir serta mengambil bentuk penampungnya. Ketika suhu makin turun, seiring dengan terlepasnya panas ke sekitar, ikatan antar-atom atau molekul makin kuat dan kaku (*rigid*) sehingga membentuk padatan melalui proses solidifikasi. Jenis-jenis ikatan antar-atom atau molekul yang utama pada benda padat, yaitu ikatan ion, ikatan kovalen, ikatan logam, dan ikatan Van der Waals (Atkins & Jones, 1997; March, 1992; Garret & Grisham, 2017; Smith, 1996).

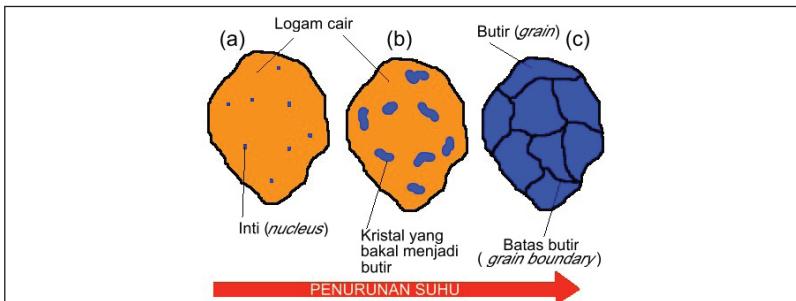
Solidifikasi adalah proses ketika susunan atom-atom dikonversi dari tidak teratur (*disordered*) pada fasa cair menjadi teratur (*ordered*) pada fasa padat, seperti terlihat pada Gambar 4. Saat sistem berubah dari cair menjadi padat, terjadi perubahan pada energi bebas Gibbs (*Gibbs free energy*) atau  $\Delta G$  yang menjadi motor penggerak bagi terjadinya proses solidifikasi. Solidifikasi kerap disebut juga pembekuan (*freezing*), yang ditandai dengan berkurangnya volume material akibat semakin tersusun rapatnya atom-atom. Selain kontraksi volume, timbul daerah-daerah pertumbuhan inti (*nucleus*) yang menjadi cikal bakal daerah padat (Gambar 5a). Inti-inti ini kemudian tumbuh menjadi kristal-kristal seiring dengan semakin meningkatnya jumlah atom yang menyusun dirinya secara teratur (Gambar 5b). Pertumbuhan lebih lanjut dari kristal-kristal berujung pada terbentuknya butiran (*grains*), dan wilayah antar-butiran ditandai dengan keberadaan batas butir (*grain boundaries*), seperti terlihat pada Gambar 5c. Material hasil proses solidifikasi yang memiliki butir dan batas butir ini disebut sebagai material polikristal. Sebagai perbandingan, material yang tidak memiliki butir dan batas butir, tetapi memiliki susunan atom yang teratur disebut sebagai material kristal tunggal (*single crystal*).

Batas butir adalah daerah ketidakteraturan di mana dua butiran atau lebih dengan orientasi kristal yang berbeda saling bertemu sehingga menimbulkan misorientasi (Gambar 6). Pada proses solidifikasi, inti-inti tumbuh menjadi kristal dan butir dengan orientasi susunan atom yang bervariasi satu sama lain. Sudut yang diapit oleh dua butiran yang berbeda orientasi disebut sudut batas butir (*grain boundary angle* atau *tilt angle*). Bergantung pada besarnya sudut batas butir, terdapat batas butir sudut kecil (*low angle grain boundary*) dengan sudut kemiringan (*tilt angle*) kurang dari  $10^\circ$  (Meyers, 2001) (Gambar 7), dan batas butir sudut besar (*high angle grain boundary*).



Sumber: What is Solidification–Javatpoint (t.t.)

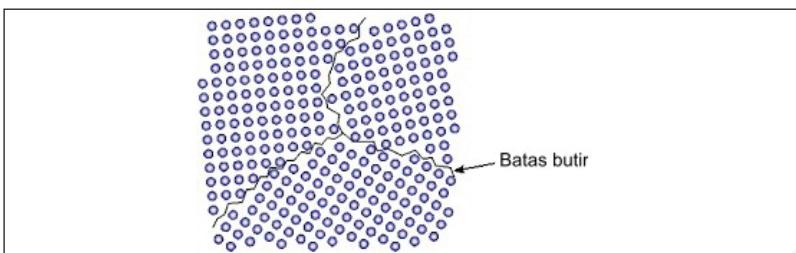
**Gambar 4.** Proses solidifikasi atau pemanatan logam yang ditandai dengan perubahan susunan atom dari tidak teratur (fasa cair) menjadi teratur (fasa padat).



Ket.: dimulai dari (a) timbulnya inti, (b) pertumbuhan inti menjadi kristal, serta (c) kristal yang telah tumbuh menjadi butir.

Sumber: Solidification of material (t.t.)

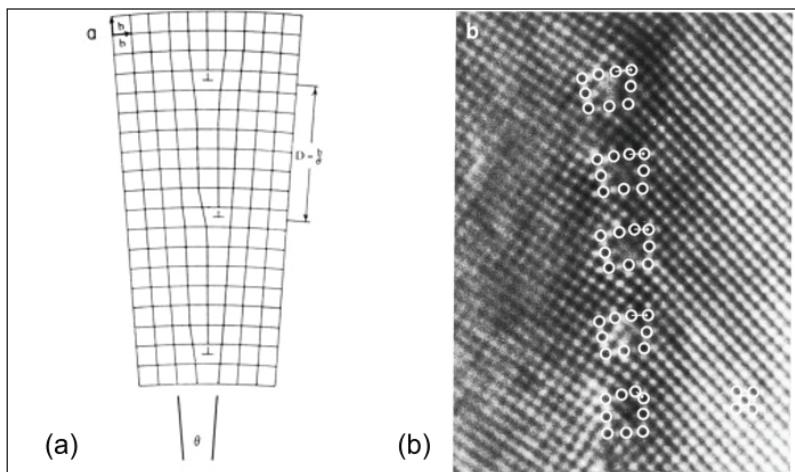
**Gambar 5.** Proses Solidifikasi



Sumber: Raghuwanshi (2015)

**Gambar 6.** Pembentukan batas butir sebagai pertemuan beberapa butiran dengan orientasi kristal yang berbeda (misorientasi).

Hal terpenting dari pembahasan solidifikasi sebagai bekal untuk mempelajari dan memahami tekstur kristalografi adalah terjadinya misorientasi kristal antarbutiran (*grains*) pada logam atau paduan logam polikristal seiring dengan proses pemanasan dari fasa cair. Ketika material padat ini mengalami deformasi, sebagian atau seluruh misorientasi kristal bertranslasi dan berotasi sehingga menghasilkan beberapa orientasi pilihan (*preferred orientations*). Orientasi kristal pilihan secara kelompok atau massal inilah yang menjadi tekstur kristalografi dari material tersebut, yang dikuantifikasi ke dalam *pole figures*, *inverse pole figures*, dan *orientation distribution function* (ODF) untuk kepentingan analisis.



Ket.: (a) Skema batas butir sudut rendah yang simetris, dan (b) TEM mikrograf dari batas butir tidak simetris pada molibdenum (Mo).

Sumber: Meyers (2001)

**Gambar 7.** Skema Batas Butir

## B. Struktur Kristal Logam

Jika berbicara tentang struktur kristal, hal tersebut tidak lepas dari pemahaman akan konsep kristalinitas. Kristalinitas adalah susunan berulang atau periodik dari atom-atom dalam cakupan yang cukup luas, dan tidak hanya untuk beberapa lapis atom saja. Dengan kata lain,

kristalinitas adalah derajat keteraturan atom-atom pada benda padat. Struktur kristal adalah cara atom, ion, atau molekul yang diatur secara spasial. Struktur kristal secara makro memiliki sel satuan (*unit cell*) yang merupakan satuan terkecil berulang dari susunan atom. Secara prinsip, yang dibahas pada subbab Struktur Kristal Logam ini adalah struktur kristal kubus pusat ruang (BCC), kubus pusat muka/sisi (FCC), serta *hexagonal close packed* (HCP).

## 1. Struktur Kristal Kubus Pusat Ruang (BCC)

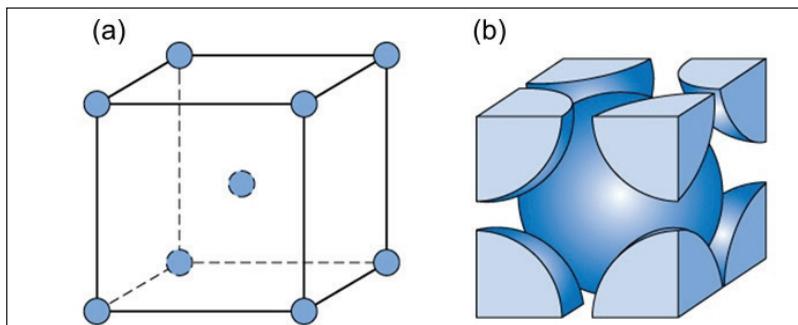
Struktur kristal ini berbasis sistem kubik, yaitu parameter kisi-kisi (*lattice parameters*) pada ketiga sumbu x, y, dan z serta sudut-sudut kristalografi di antara ketiga sumbu tersebut sama. Hal ini dinotasikan sebagai  $a = b = c$  dan  $\alpha = \beta = \gamma$ . Gambar 8 menunjukkan pola dan struktur kristal dari sebuah sel satuan kubus pusat ruang (BCC) (Callister & Rethwisch, 2018). Satu sel satuan BCC mengandung dua atom yang merupakan gabungan dari satu atom di tengah sel satuan dan delapan atom di sudut yang tiap porsinya 1/8. Bilangan koordinasi (CN), atau jumlah atom tetangga atau atom sekitar yang paling dekat pada struktur BCC, adalah delapan. Atom di tengah sel satuan BCC bersentuhan dengan delapan atom di sudut. Setiap atom di sudut merupakan bagian dari delapan sel satuan. Ini berarti setiap atom di sudut bersentuhan dengan delapan atom di tengah sel-sel satuan yang melingkupinya. Tingkat kerapatan atom (*atomic packing factor/APF*) pada BCC adalah 0,68 atau 68%. Ini berarti dalam satu sel satuan BCC, 68% volume diisi oleh atom dan 32% adalah ruang kosong.

Terdapat 12 bidang *slip* (*slip plane*) dari {110} yang masing-masing memiliki empat arah *slip* (*slip direction*), yaitu [111], [1̄11], [11̄1], dan [1̄1̄1], sehingga untuk kelompok bidang *slip* {110} terdapat  $12 \times 4 = 48$  sistem *slip*. Selain itu, terdapat 48 bidang *slip* dari {123} yang masing-masing memiliki dua arah *slip*, yaitu [1̄11] dan [11̄1], sehingga untuk kelompok bidang *slip* {123} terdapat  $48 \times 2 = 96$  sistem *slip*. Juga terdapat 24 bidang *slip* dari {112} masing-masing memiliki dua arah *slip*, yaitu [1̄11] dan [11̄1], sehingga untuk kelompok bidang *slip* {112} terdapat  $24 \times 2 = 48$  sistem *slip*. Dibandingkan struktur kubus pusat muka/sisi (FCC), jumlah sistem *slip* BCC jauh lebih banyak. Namun,

hal ini tidak menjadikan logam berstruktur BCC lebih ulet (*ductile*) daripada logam berstruktur FCC, akibat keberadaan tegangan friksi kisi-kisi (Soboyejo, 2003) serta tidak terlalu rapatnya jarak antar-atom di BCC. Beberapa contoh logam berstruktur kristal BCC adalah besi (Fe), niobium (Nb), vanadium (V), kromium (Cr), mangan (Mn), molibdenum (Mo), serta tungsten atau wolfram (W).

## 2. Struktur Kristal Kubus Pusat Muka/Sisi (FCC)

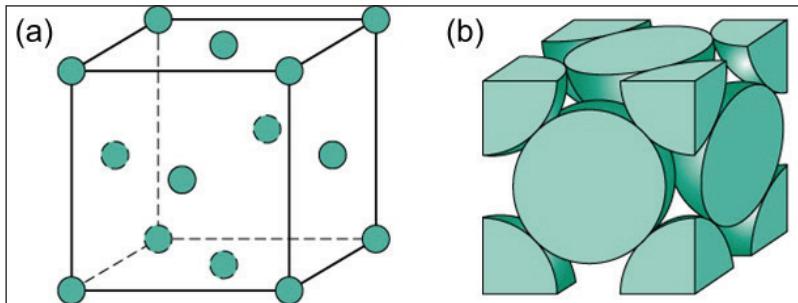
Seperti BCC, struktur kristal kubus pusat muka/sisi ini berbasis sistem kubik. Gambar 9 menunjukkan pola dan struktur kristal dari sebuah sel satuan kubus pusat muka/sisi (FCC) (Callister & Retwisch, 2018). Satu sel satuan FCC mengandung empat atom, yang merupakan gabungan dari enam atom di setiap sisi yang tiap porsinya 1/2 dan delapan atom di sudut yang tiap porsinya 1/8. Bilangan koordinasi (CN) struktur BCC adalah 12. Atom di setiap sudut bersentuhan dengan atom di tengah muka/sisi. Atom di setiap sudut juga dilingkupi oleh empat muka/sisi di bidang x, empat di bidang y, dan empat di bidang z, sehingga terdapat  $4 \times 3 = 12$  atom pusat muka/sisi yang bersentuhan dengan atom di sudut. Tingkat kerapatan atom (APF) pada FCC adalah 0,74 atau 74%. Ini berarti dalam satu sel satuan FCC, 74% volume diisi oleh atom dan 26% adalah ruang kosong. Struktur FCC lebih rapat daripada struktur BCC.



Ket.: (a) Pola sel satuan struktur kubus pusat ruang (BCC), (b) penempatan atom pada pola sel satuan BCC.

Sumber: Callister & Retwisch (2018)

**Gambar 8.** Pola dan Struktur Kristal dari Sebuah Sel Satuan Kubus Pusat Ruang (BCC).



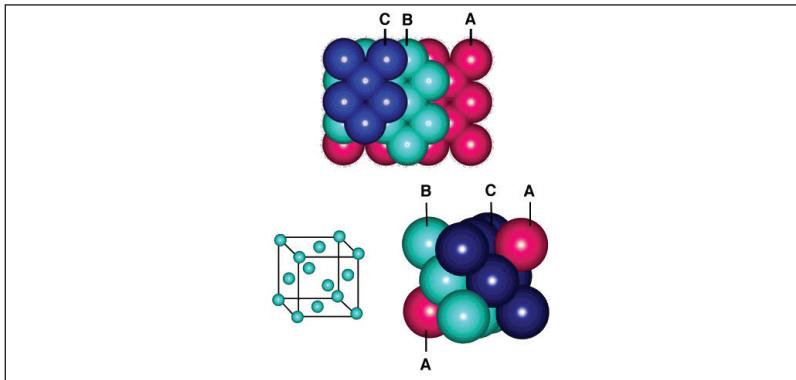
Ket.: (a) Pola sel satuan struktur kubus pusat muka/sisi (FCC), dan (b) penempatan atom pada pola sel satuan FCC.

Sumber: Callister & Retsch (2018)

**Gambar 9.** Pola dan Struktur Kristal dari Sebuah Sel Satuan Kubus Pusat Muka/Sisi (FCC)

Konfigurasi atom pada struktur FCC berasal dari susunan berulang dengan pola ABCABC, seperti terlihat pada Gambar 10. Lapisan pertama terdiri atas atom-atom yang bersentuhan, dengan tiap atom memiliki enam atom tetangga atau enam atom sekitar terdekat di bidangnya. Lapisan kedua dibentuk dengan menempatkan atom di kemiringan lapisan pertama. Atom lapisan ketiga ditempatkan di atas celah lapisan pertama. Jadi, lapisan kedua menutupi setengah lubang di lapisan pertama dan lapisan ketiga terletak di atas lubang yang tersisa. Susunan ini menghasilkan pola ABCABC yang sesuai dengan kisi sel satuan kubus pusat muka/sisi.

Mekanisme *slip* atau mobilitas dislokasi pada struktur FCC terjadi pada bidang-bidang kristalografi yang rapat (*close packed planes*). Bidang-bidang padat tersebut adalah bidang {111}, dengan pergerakan dislokasi atau *slip* terjadi pada arah  $\langle\bar{1}10\rangle$ . Terdapat empat bidang *slip* {111} dengan tiga arah *slip*  $\langle\bar{1}10\rangle$ , sehingga FCC memiliki  $4 \times 3 = 12$  sistem *slip*. Keberadaan 12 sistem *slip* pada bidang {111} yang padat ini beserta tingkat kerapatan atom (APF) sebesar 74% menyebabkan logam-logam FCC lebih mudah mengalami deformasi plastis dibandingkan logam-logam BCC. Beberapa contoh logam berstruktur kristal FCC adalah kalsium (Ca), stronsium (Sr), tembaga (Cu), nikel (Ni), aluminium (Al), perak (Ag), dan emas (Au).



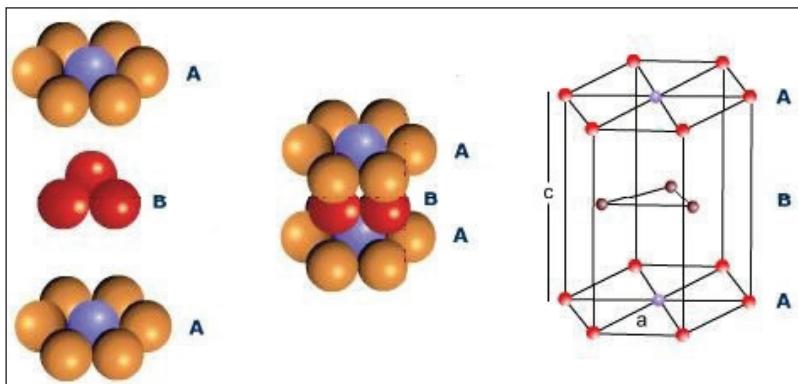
Sumber: Fullerene Science Module (t.t.)

**Gambar 10.** Pola penyusunan lapisan-lapisan atom secara ABCABC menghasilkan struktur kristal kubus pusat muka/sisi (FCC).

### 3. Struktur Hexagonal Close Packed (HCP)

Tidak seperti BCC dan FCC, struktur HCP terbentuk berbasis sistem heksagonal dengan hubungan antar-parameter kisi-kisi adalah  $a = b \neq c$ , serta  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ . Gambar 11 menunjukkan bahwa struktur HCP tersusun berdasarkan pada pola ABABAB, kontras dengan struktur FCC yang berpola ABCABC.

Pada struktur HCP ini, terdapat 12 atom di sudut-sudut dari dua bidang basal, masing-masing enam atom di bidang basal atas dan enam atom di bidang basal bawah. Tiap atom di sudut-sudut bidang basal ini memiliki porsi  $1/6$  untuk setiap sel satuan HCP. Dengan demikian, jumlah atom efektif di dua bidang basal HCP adalah  $12 \times 1/6 = 2$  atom. Selain itu, ada dua atom di tengah bidang basal atas dan bawah yang masing-masing memiliki porsi  $1/2$  untuk setiap sel satuan HCP, sehingga ada  $2 \times 1/2 = 1$  atom di tengah bidang basal. Di interior sel satuan HCP terdapat tiga atom, sehingga jumlah atom efektif per sel satuan HCP adalah  $2 + 1 + 3 = 6$  atom. Tabel 1 merangkum perhitungan serta jumlah atom efektif di struktur BCC, FCC, dan HCP.



Sumber: Height of HCP Unit Cell (t.t.)

**Gambar 11.** Susunan atom-atom pada struktur HCP berpola ABABAB secara berulang.

Mekanisme *slip* di struktur HCP lebih terbatas dibandingkan BCC dan FCC. *Slip* pada HCP terjadi pada bidang *basal*, bidang *pyramidal* orde 1 dan 2, serta bidang prisma orde 1 dan 2 (Jackson, 1991; Zheng dkk., 2016). Karena keterbatasan sistem *slip* ini, banyak logam berstruktur HCP harus mengandalkan juga mekanisme kembaran (*twinning mechanisms*) agar dapat melakukan deformasi plastis. Hal ini membutuhkan tegangan geser kritis (*critical resolved shear stress*) yang tinggi sehingga tidak sedikit logam HCP yang mengalami kegagalan (*failure*) bila terjadi deformasi berlebihan. Beberapa contoh logam berstruktur HCP adalah berilium (Be), magnesium (Mg), titanium (Ti), zirkonium (Zr), seng (Zn), kobalt (Co), dan itrium (Y). Tabel 2 merangkum sistem *slip* pada BCC, FCC, dan HCP.

### C. Simetri Kristal

Sebuah benda dikatakan simetris terhadap suatu transformasi jika benda tersebut tampak seperti pada situasi atau kondisi asli sebelum transformasi. Simetri pada kristalografi juga dapat dipandang sebagai pergerakan semu dari sebuah benda yang mencakup pergerakan rotasi dan translasi. Pergerakan semu ini disebut sebagai operasi simetri (*symmetry operation*), sedangkan lokasi terjadinya operasi simetri disebut sebagai elemen simetri (*symmetry elements*) (Glusker dkk., 1995).

Adapun yang termasuk elemen simetri adalah sumbu rotasi (*rotation axis*), bidang cermin (*mirror plane*), dan pusat inversi (*inversion center*). Tabel 3 merangkum simetri pada tujuh sistem kristal utama.

Dikaitkan dengan tekstur kristalografi, khususnya observasi dan analisis dengan *pole figures*, pembahasan tentang simetri mencakup utamanya dua aspek, yaitu rotasi tepat (*proper rotation*) dan rotasi tidak tepat (*improper rotation*). Rotasi tidak tepat disebut juga *roto-inversion*.

**Tabel 1.** Jumlah Atom Efektif di Struktur BCC, FCC, dan HCP

No	Struktur Kristal	Posisi Atom	Jumlah Atom Efektif per Sel Satuan
1	BCC	8 sudut + 1 interior	1 (sudut-sudut) + 1 (interior) = 2
2	FCC	8 sudut + 6 pusat muka/sisi	1 (sudut-sudut) + 6 x $\frac{1}{2}$ (pusat muka/sisi) = 4
3	HCP	12 sudut bidang basal + 2 di tengah bidang basal + 3 interior	12 x $\frac{1}{6}$ (sudut-sudut basal) + 2 x $\frac{1}{2}$ (tengah basal) + 3 (interior) = 6

Sumber: Closest Packed Structures-Chemistry LibreTexts (t.t.)

**Tabel 2.** Rangkuman Sistem Slip pada BCC, FCC, dan HCP

Struktur Kristal	Bidang Slip	Jumlah Bidang Slip	Arah Slip	Jumlah Arah Slip	Jumlah Sistem Slip
BCC	{110}	12	[111]		
			[1 $\bar{1}$ 1]		
			[11 $\bar{1}$ ]		
			[1 $\bar{1}$ $\bar{1}$ ]		
FCC	{112}	24	[ $\bar{1}$ 11]		
			[11 $\bar{1}$ ]		
FCC	{123}	48	[ $\bar{1}$ 11]		
			[11 $\bar{1}$ ]		
			[1 $\bar{1}$ 1]		
FCC	(111) (1 $\bar{1}$ 1) ( $\bar{1}$ 11) ( $\bar{1}$ 1 $\bar{1}$ )	4	[ $\bar{1}$ 10] = [1 $\bar{1}$ 0]		
			[0 $\bar{1}$ 1] = [01 $\bar{1}$ ]		
			[ $\bar{1}$ 01] = [10 $\bar{1}$ ]		
				3	12

Struktur Kristal	Bidang Slip	Jumlah Bidang Slip	Arah Slip	Jumlah Arah Slip	Jumlah Sistem Slip
HCP	<i>Basal</i> {0001}		<11̄20>		
	Prisma {1̄100} {11̄20}		<11̄20>		
	<i>Pyramidal</i> {hkin} di mana n = bilangan bulat		<11̄20>		

Sumber: Jackson (1991); Zheng dkk. (2016)

**Tabel 3.** Tujuh Sistem Kristal Beserta Simetrinya

Sistem Kristal	Parameter Sel	Kisi-Kisi Bravais (Bravais Lattices)	Simetri	Simetri Laue
Kubik	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	cP, CF, cl	$2/\bar{3}m$ , $m\bar{3}m$	$m\bar{3}(T_h)$ , $m\bar{3}m(O_h)$
Heksagonal	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	hP	$6/m$ , $6/mmm$	$6/m(C_{6h})$ , $6/mmm(D_{6h})$
Trigonal:				
Heksagonal	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	hP	$\bar{3}, \bar{3}m$	$\bar{3}(C_{3i})$ , $\bar{3}m(D_{3d})$
Rombohedral	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	rR	$\bar{3}, \bar{3}m$	$\bar{3}(C_{3i})$ , $\bar{3}m(D_{3d})$
Tetragonal	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	tP, tl	$4/m$ , $4/mmm$	$4/m(C_{4h})$ , $4/mmm(D_{4h})$
Ortorombik	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	oP, oS, oF, ol	Mmm	Mmm(D <sub>2h</sub> )
Monoklinik	$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	mP, mS	2/m	$2/m(C_{2h})$
Triklinik	$a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma$	aP	1	1(C <sub>1</sub> )

Sumber: Schoenfliess (1891); Schoenfliess (1923); Kelly & Knowles (2020)

## 1. Rotasi Tepat (*Proper Rotation*)

Operasi rotasi tepat dengan notasi lipat  $-n$  ( $C_n$ ) adalah perputaran berlawanan arah jarum jam (*countrerclock wise*) sebesar  $(360/n)^\circ$  pada sumbu putar yang melewati sebuah benda. Jika operasi rotasi lipat  $-n$  ini dilakukan sebanyak  $n$  kali, benda akan kembali ke posisi semula. Untuk operasi rotasi tepat ini, hanya ada sumbu-sumbu simetri lipat  $-1, -2, -3, -4$ , dan  $-6$  untuk sebuah kristal. Gambar 12 hingga Gambar 16 memperlihatkan beberapa contoh objek atau benda dengan simetri lipat  $-1, -2, -3, -4$ , dan  $-6$ .

- Rotasi lipat  $-1$  ( $C_1$ )



Sumber: Premium Mango - Each (t.t.)

**Gambar 12.** Buah Mangga dengan Rotasi Lipat  $-1$ .

Untuk mentransformasi buah mangga pada Gambar 12 ke posisi semula, hanya ada dua pilihan rotasi, yaitu putaran  $0^\circ$  atau  $360^\circ$ . Rotasi jenis ini disebut juga sebagai operasi identitas atau jati diri (*identity operation*).

- Rotasi lipat  $-2$  ( $C_2$ )



Sumber: Dynam 13" x 6" - Carbon Fiber Two Blade Prop PRO.1306 (t.t.)

**Gambar 13.** Propeler Dua Bilah dengan Rotasi Lipat  $-2$ .

Untuk mentransformasi dua bilah pada Gambar 13 ke posisi semula, diperlukan rotasi  $360^\circ/2 = 180^\circ$ .

- c. Rotasi lipat -3 ( $C_3$ )



Sumber: Silver Three Blade Knife (t.t.)

**Gambar 14.** Pisau Tiga Mata dengan Rotasi Lipat -3.

Untuk mentransformasi pisau tiga mata pada Gambar 14 ke posisi semula, diperlukan rotasi  $360^\circ/3 = 120^\circ$ .

- d. Rotasi lipat -4 ( $C_4$ )



Sumber: Michigan Wheel 32 inch DynaQuad 4 Blade Bronze (t.t.)

**Gambar 15.** Propeler Empat Bilah dengan Rotasi Lipat -4.

Untuk mentransformasi propeler empat bilah pada Gambar 15 ke posisi semula, diperlukan rotasi  $360^\circ/4 = 90^\circ$ .

- e. Rotasi lipat -6 ( $C_6$ )



Sumber: Composite Propellers:  
Turboprop Engine Aircraft (t.t.)

**Gambar 16.** Propeler Enam Bilah dengan Rotasi Lipat -6.

Untuk mentransformasi propeller enam bilah pada Gambar 16 ke posisi semula, diperlukan rotasi  $360^\circ/6 = 60^\circ$ .

## 2. Rotasi Tidak Tepat (*Improper Rotation* atau *Roto-Inversion*)

Prinsip dari rotasi tidak tepat adalah proses rotasi tepat diikuti inversi pada titik tertentu di sumbu putar dari sebuah benda. Ada tiga jenis *roto-inversion*, yaitu

- a.  $\bar{3}$  *Roto-Inversion*. Operasi ini mencakup rotasi putar  $360^\circ/3 = 120^\circ$ , dilanjutkan dengan inversi terhadap pusat benda;
- b.  $\bar{4}$  *Roto-Inversion*. Operasi ini mencakup rotasi putar  $360^\circ/4 = 90^\circ$ , dilanjutkan dengan inversi terhadap pusat benda; serta
- c.  $\bar{6}$  *Roto-Inversion*. Operasi ini mencakup rotasi putar  $360^\circ/6 = 60^\circ$ , dilanjutkan dengan inversi terhadap pusat benda.

## 3. Simbolisasi Rotasi Tepat dan Rotasi Tidak Tepat

Diperlukan simbolisasi untuk mempermudah analisis *pole figures* ketika simetri kristal diperlukan. Tabel 4 memperlihatkan simbolisasi dari rotasi tepat dan rotasi tidak tepat.

**Tabel 4.** Simbolisasi rotasi tepat (*proper rotation*) dan rotasi tidak tepat (*improper rotation atau roto-inversion*)

Jenis Rotasi	Simbol
<b>Rotasi Tepat (<i>Proper Rotation</i>)</b>	
Lipat -1 ( $C_1$ )	
Lipat -2 ( $C_2$ )	●
Lipat -3 ( $C_3$ )	▲
Lipat -4 ( $C_4$ )	■
Lipat -6 ( $C_6$ )	◆
<b>Rotasi Tidak Tepat (<i>Improper Rotation atau Roto-Inversion</i>)</b>	
$\bar{3}$ Roto-Inversion	▲
$\bar{4}$ Roto-Inversion	◆
$\bar{6}$ Roto-Inversion	◆▲

Sumber: Kelly & Knowles (2020)

## D. Indeks Miller Bidang dan Arah

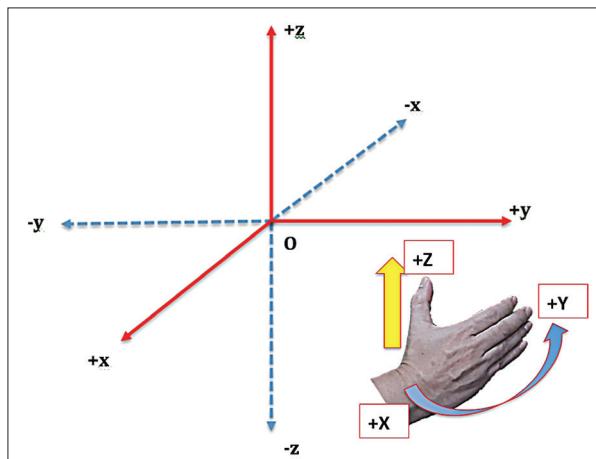
### 1. Indeks Miller Bidang

#### a. Struktur Kristal Kubik

Langkah-langkah untuk penamaan bidang kristalografi dengan indeks Miller (hkl) pada sistem kristal kubik adalah

- 1) Tentukan titik-titik perpotongan antara bidang kristalografi “*of interest*” dan sumbu x, y, serta z dalam panjang satuan (*unit length*). Sistem koordinat *Cartesian* tiga dimensi untuk sumbu x, y, dan z menggunakan kaidah tangan kanan, yaitu empat jari tangan kanan yang melengkung (selain ibu jari) menunjukkan putaran berlawanan arah jarum jam dari sumbu x ke sumbu y, sedangkan ibu jari ke atas menunjukkan sumbu z. Tentukan titik perpotongan di setiap sumbu ini satu per satu secara berurutan, dimulai pada sumbu x, lalu sumbu y, dan terakhir sumbu z. Penting untuk diperhatikan bahwa:

- a) Titik O (*origin*) tidak dilewati oleh bidang kristalografi “*of interest*” sehingga bila bidang kristalografi “*of interest*” pada awalnya melewati titik O, titik O tersebut (bukan bidangnya) perlu digeser/dipindahkan sedemikian rupa sepanjang rusuk-rusuk sel satuan hingga ke suatu sudut ketika posisi titik O yang baru tidak dilalui bidang kristalografi “*of interest*” tersebut.
- b) Sistem koordinat *Cartesian* juga memiliki sumbu negatif. Ini berarti, selain sumbu x (+), sumbu y (+), dan sumbu z (+), terdapat sumbu x (-), sumbu y (-), dan sumbu z (-). Sumbu negatif ini keberadaannya kerap “*taken for granted*” sehingga nyaris terabaikan. Gambar 17 menunjukkan sistem koordinat *Cartesian* tiga dimensi berkaidah tangan kanan.
- c) Jika bidang kristalografi tidak memiliki perpotongan dengan suatu sumbu atau sejajar dengan sumbu tersebut, konvensi/kesepakatan untuk titik perpotongannya adalah tidak terhingga atau  $\infty$ .



Sumber: 3d coordinate axis vector (t.t.)

**Gambar 17.** Sistem koordinat *Cartesian* tiga dimensi berkaidah tangan kanan dengan sumbu (+) dan (-).

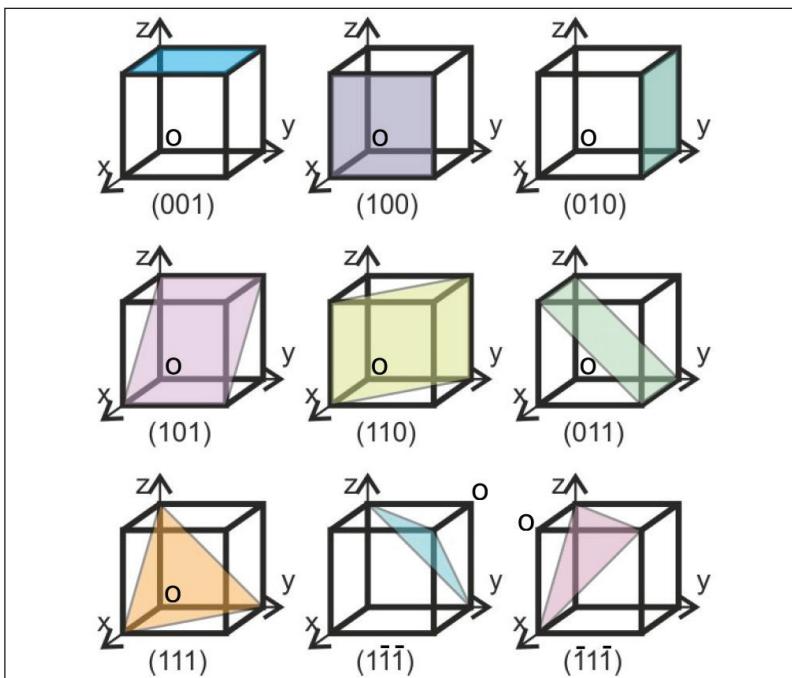
- 2) Ambil kebalikan (*reciprocal*) dari titik-titik perpotongan pada sumbu x, y, dan z tersebut. Sebagai contoh, kebalikan dari 2 adalah

$1/2$ , kebalikan dari  $3$  adalah  $1/3$ , kebalikan dari  $1$  adalah  $1$ , dan kebalikan dari  $\infty$  adalah  $0$ . “Kebalikan” berbeda dengan “lawan”, misalnya lawan dari  $2$  adalah  $-2$ , lawan dari  $3$  adalah  $-3$ , dan lawan dari  $1$  adalah  $-1$ .

- 3) Masukkan hasil kebalikan dari titik-titik perpotongan itu ke dalam tanda kurung ( ), sehingga menjadi (hkl), tanpa penulisan tanda koma di antara nilai-nilai indeks tersebut. Bedakan dengan penulisan koordinat dua dimensi atau tiga dimensi yang menggunakan tanda koma antarbilangan koordinatnya. Perlu diingat kembali bahwa penggunaan tanda kurung ( ) adalah untuk indeksasi bidang kristalografi yang spesifik, bukan kelompok bidang. Untuk kelompok bidang dengan simetri yang sama, digunakan tanda kurung { } atau {hkl}. Penting untuk diperhatikan bahwa:
  - a) Bila titik perpotongan dan kebalikannya negatif karena terjadi pada sumbu negatif, tanda (-) ditempatkan di atas angka indeks. Sebagai contoh,  $(\bar{1}\bar{1}1)$  atau  $(\bar{2}\bar{1}1)$ .
  - b) Bila setelah diambil kebalikannya terjadi bentuk pecahan, ketiga nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan faktor persekutuan terkecil (FPK) dari penyebut mereka (bukan pembilang) untuk menjadikannya bilangan bulat. Sebagai contoh jika hasil kebalikan adalah  $(^3/_2 ^4/_3 1)$ , ketiga nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan 6 sebagai FPK dari ketiga penyebut 2, 3, dan 1 sehingga menghasilkan (986).
- 4) Lakukan langkah di atas secara terbalik, yaitu dari nomor 3, 2, dan kemudian 1, untuk menggambar bidang kristalografi “*of interest*”. Jika indeks Miller bidang terdiri atas angka-angka lebih dari satu, ketiga angka indeks perlu terlebih dahulu dibagi dengan bilangan terkecil di antara mereka. Sebagai contoh, jika indeks Miller bidang yang akan digambar adalah  $(543)$ , ketiga angka indeks perlu dibagi terlebih dahulu dengan 3 sebagai bilangan terkecil di indeks tersebut untuk menghasilkan  $(^5/_3 ^4/_3 1)$ . Setelah itu, baru lakukan kebalikan untuk memperoleh titik-titik perpotongan pada sumbu x, y, dan z, yaitu untuk contoh bidang  $(543)$  titik-titik perpotongannya adalah  $^3/_5$ ,  $^3/_4$ , dan  $1$ . Dapat disimpulkan bahwa jika indeks Miller

bidang mengandung angka indeks lebih besar dari satu, perpotongan bidangnya berada antara titik *origin* (O) dan sudut-sudut sel satuan.

Gambar 18 memperlihatkan contoh beberapa bidang kristalografi beserta indeks Miller-nya. Coba terapkan langkah-langkah nomor 1 sampai 3 ke bidang-bidang kristalografi pada gambar tersebut untuk memastikan pemahaman yang baik terhadap tata cara penamaan bidang kristalografi atau indeks Miller di struktur kubik. Perhatikan bahwa untuk dua bidang di kanan bawah pada Gambar 18, yaitu  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  dan  $(\bar{1}1\bar{1})$ , posisi titik *origin* (O) telah digeser/dipindah.



Sumber: Waeselmann (2012)

**Gambar 18.** Beberapa contoh bidang kristalografi pada sistem kristal kubik beserta indeks Miller-nya. Perhatikan posisi-posisi titik *origin* (O).

### b. Struktur Kristal *Hexagonal Close Packed*

Indeks bidang pada struktur kristal HCP memiliki empat angka atau dinotasikan sebagai  $(hkil)$  yang dikenal sebagai indeks Miller-Bravais. Gambar 19 memperlihatkan sistem koordinat pada struktur HCP. Penting untuk juga memperhatikan keberadaan sumbu-sumbu positif (+) dan negatif (-). Tata cara penamaan bidang pada struktur HCP serupa dengan tata cara penamaan bidang pada struktur kubik, yaitu

- 1) Tentukan titik-titik perpotongan antara bidang kristalografi “*of interest*” dan sumbu  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , serta  $c$  dalam panjang satuan (*unit length*), baik pada sumbu positif (+) maupun negatif (-).
- 2) Ambil kebalikan (*reciprocal*) dari titik-titik perpotongan pada sumbu  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , dan  $c$  tersebut.
- 3) Masukkan hasil kebalikan dari titik-titik perpotongan itu ke dalam tanda kurung ( ), sehingga menjadi  $(hkil)$ , tanpa penulisan tanda koma di antara nilai-nilai indeks tersebut.
- 4) Lakukan langkah tersebut di atas secara terbalik, yaitu dari nomor 3, lalu 2, dan kemudian 1, untuk menggambar bidang kristalografi “*of interest*”.

Pada struktur HCP ini, terdapat korelasi antara indeks  $i$  dan  $h$  serta  $k$ , seperti tertera pada Persamaan 2.1. Korelasi ini diturunkan berbasis aturan penjumlahan dan pengurangan pada vektor. Gambar 20 memperlihatkan beberapa contoh bidang kristalografi pada struktur HCP. Coba terapkan langkah-langkah nomor 1 sampai 3 ke bidang-bidang kristalografi pada Gambar 20 untuk memastikan pemahaman yang baik terhadap tata cara penamaan bidang kristalografi dengan indeks Miller-Bravais pada struktur HCP.

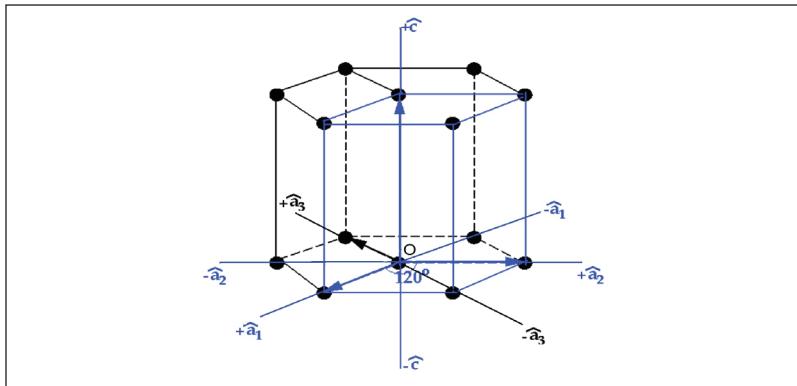
$$i = - (h+k) \quad \text{Persamaan 2.1}$$

## 2. Indeks Miller Arah

### a. Struktur Kristal Kubik

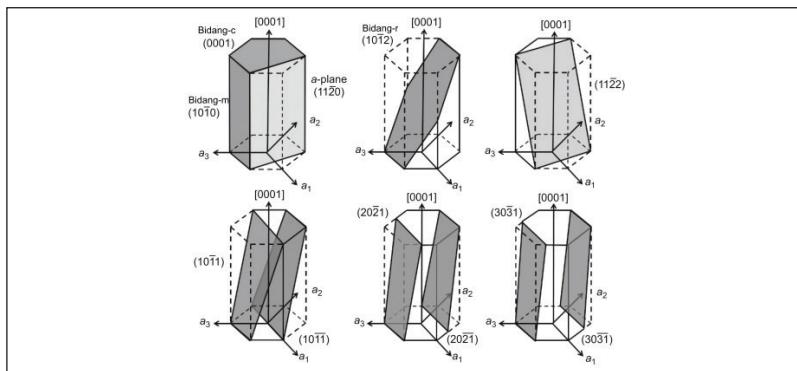
Tata cara penamaan arah kristalografi pada sistem kristal kubik lebih sederhana dibandingkan tata cara penamaan bidang. Bagi yang pernah

belajar persamaan vektor, baik dua dimensi maupun tiga dimensi, seharusnya lebih mudah untuk memahami tata cara penamaan arah ini. Lebih mudah lagi jika merujuk kembali pada cara penentuan titik koordinat dua-dimensi maupun tiga-dimensi pada sistem koordinat *Cartesian*. Seperti pada penamaan bidang kristalografi, sistem koordinat *Cartesian* untuk arah kristalografi menggunakan kaidah tangan kanan (lihat Gambar 17), termasuk keberadaan sumbu-sumbu negatif (-).



Sumber: Hexagonal Close-Packed (HCP) Unit (t.t.)

**Gambar 19.** Sistem Koordinat pada Struktur Kristal HCP



Ket.: Perhatikan istilah bidang-c yang merupakan bidang basal, bidang-m yang merupakan bidang prisma, serta bidang-r yang merupakan bidang diagonal ruang.

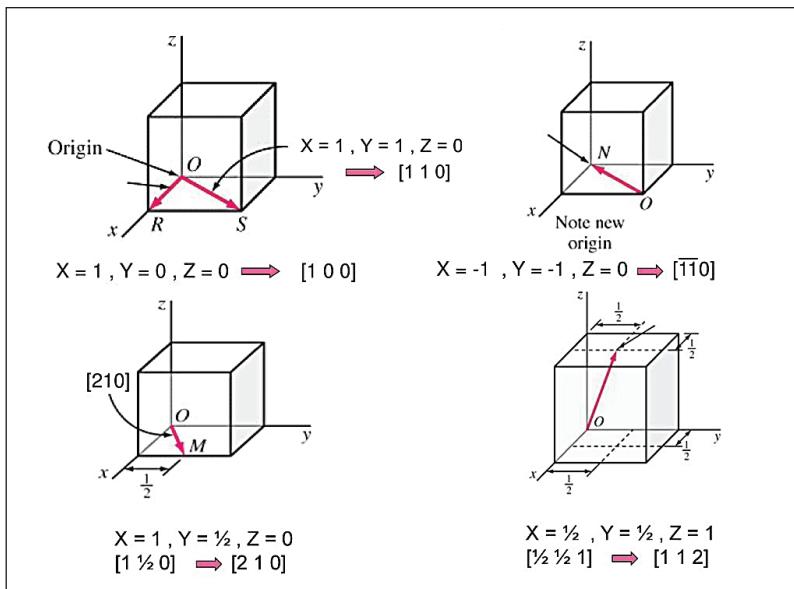
Sumber: Huang dkk. (2013)

**Gambar 20.** Beberapa contoh bidang kristalografi pada sistem kristal HCP beserta indeks Miller-nya.

Langkah-langkah penentuan indeks Miller arah kristalografi pada sistem kristal kubik adalah

- 1) Telusuri ujung akhir dari arah atau vektor kristalografi “*of interest*”, dimulai pada titik origin (O) dengan urutan penelusuran: sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Penting untuk diperhatikan bahwa tidak seperti pada penamaan bidang kristalografi, titik *origin* (O) justru dilewati oleh arah atau vektor kristalografi “*of interest*”.
- 2) Masukkan panjang satuan hasil penelusuran di setiap sumbu tersebut ke dalam tanda kurung [ ] tanpa menggunakan tanda koma di antara nilai-nilai indeks tersebut sehingga menjadi [uvw]. Metode ini serupa dengan cara penentuan titik koordinat tiga-dimensi pada sistem koordinat *Cartesian*. Perlu diingat kembali bahwa penggunaan tanda kurung [ ] adalah untuk indeksasi arah kristalografi yang spesifik, bukan kelompok arah. Untuk kelompok arah dengan simetri yang sama, digunakan tanda kurung < > atau <uvw>. Penting untuk diperhatikan bahwa:
  - a) Tidak perlu mengambil kebalikan (*reciprocal*) dari hasil penelusuran panjang satuan di setiap sumbu.
  - b) Bila panjang satuan terjadi pada sumbu negatif, tanda (-) di tempatkan di atas angka indeks, contohnya [1̄10] atau [2̄10].
  - c) Bila panjang satuan berbentuk pecahan, ketiga nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan faktor persekutuan terkecil (FPK) dari penyebut mereka (bukan pembilang) untuk menjadikannya bilangan bulat. Sebagai contoh jika hasil penelusuran panjang satuan pada ketiga sumbu adalah [ $\frac{2}{3} \frac{3}{4} 1$ ], ketiga nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan 12 sebagai FPK dari ketiga penyebut 3, 4, dan 1, sehingga menghasilkan [8 9 12].
- 3) Lakukan langkah di atas secara terbalik, yaitu dari nomor 2 kemandian 1, untuk menggambar arah kristalografi “*of interest*”. Jika indeks Miller arah terdiri atas angka-angka lebih dari satu, ketiga angka indeks tersebut perlu dibagi terlebih dahulu dengan bilangan terbesar di antara mereka. Sebagai contoh jika indeks Miller arah yang akan digambar adalah [453], ketiga angka indeks perlu

dibagi terlebih dahulu dengan 5 sebagai bilangan terbesar pada indeks tersebut untuk menghasilkan  $\left[\frac{4}{5} \ 1 \ \frac{3}{5}\right]$ . Untuk menggambar arah atau vektornya, tentukan dulu titik koordinat  $(\frac{4}{5}, 1, \frac{3}{5})$  pada sel satuan, setelah itu tarik garis vektor dari titik O ke titik koordinat  $(\frac{4}{5}, 1, \frac{3}{5})$  tersebut. Gambar 21 memperlihatkan penamaan indeks Miller untuk beberapa contoh arah kristalografi. Coba terapkan langkah-langkah nomor 1 dan 2 ke arah-arah kristalografi pada gambar tersebut untuk memastikan pemahaman yang baik terhadap tata cara penamaan arah kristalografi dengan indeks Miller di struktur kubik.



Ket.: Perhatikan arah atau vektor kristalografi melewati titik O.

Sumber: Groups: Fill in this table (t.t.)

**Gambar 21.** Penamaan Indeks Miller untuk Beberapa Contoh Arah atau Vektor Kristalografi

### b. Struktur Kristal Hexagonal Close Packed

Pada struktur HCP, sistem koordinat untuk penentuan indeks Miller arah tetap mengacu pada Gambar 19. Langkah-langkah penentuan indeks Miller-Bravais arah kristalografi pada sistem kristal HCP, yaitu

- 1) Telusuri ujung akhir dari arah atau vektor kristalografi “*of interest*”, dimulai pada titik *origin* (O) dengan urutan penelusuran: sumbu  $a_1$ , sumbu  $a_2$ , sumbu  $a_3$ , dan sumbu c. Serupa dengan sistem kristal kubik, titik *origin* (O) pada HCP juga dilewati oleh arah atau vektor kristalografi “*of interest*”.
- 2) Masukkan panjang satuan hasil penelusuran di setiap sumbu tersebut ke dalam tanda kurung [ ], tanpa penulisan tanda koma di antara nilai-nilai indeks tersebut sehingga menjadi [uvtw]. Perlu diingat kembali bahwa penggunaan tanda kurung [ ] adalah untuk indeksasi arah kristalografi yang spesifik, bukan kelompok arah. Untuk kelompok arah dengan simetri yang sama, digunakan tanda kurung < > atau <uvtw>. Penting untuk diperhatikan bahwa:
  - a) Tidak perlu mengambil kebalikan (*reciprocal*) dari hasil penelusuran panjang satuan di setiap sumbu.
  - b) Bila panjang satuan terjadi pada sumbu negatif, tanda (-) di tempatkan di atas angka indeks. Sebagai contoh,  $[1\bar{1}01]$  atau  $[\bar{2}\bar{1}30]$ .
  - c) Bila panjang satuan berbentuk pecahan, keempat nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan faktor persekutuan terkecil (FPK) dari penyebut mereka (bukan pembilang) untuk menjadikannya bilangan bulat. Sebagai contoh, jika hasil penelusuran panjang satuan pada keempat sumbu adalah  $[\frac{2}{3}, \frac{3}{4}, -\frac{17}{12}, \frac{1}{2}]$ , keempat nilai indeks tersebut perlu dikalikan dengan 12 sebagai FPK dari keempat penyebut 3, 4, 12, dan 2 sehingga menghasilkan  $[8\ 9\ \bar{17}\ 6]$ .
- 3) Lakukan langkah di atas secara terbalik, yaitu dari nomor 2, kemandian 1 untuk menggambar arah kristalografi “*of interest*”. Jika indeks Miller arah terdiri atas angka-angka lebih dari satu, keempat angka indeks tersebut perlu dibagi terlebih dahulu dengan bilangan terbesar di antara mereka. Sebagai contoh, jika indeks Miller arah yang akan digambar adalah  $[45\bar{9}1]$ , ketiga angka indeks perlu dibagi terlebih dahulu dengan 9 sebagai bilangan terbesar pada indeks tersebut untuk menghasilkan  $[\frac{4}{9}, \frac{5}{9}, \bar{1}\frac{1}{9}]$ . Untuk menggambar arah atau vektornya, tentukan dulu titik koordinat  $(\frac{4}{9}, \frac{5}{9}, \bar{1}, \frac{1}{9})$  pada sel satuan, setelah itu tarik garis vektor dari titik O ke titik

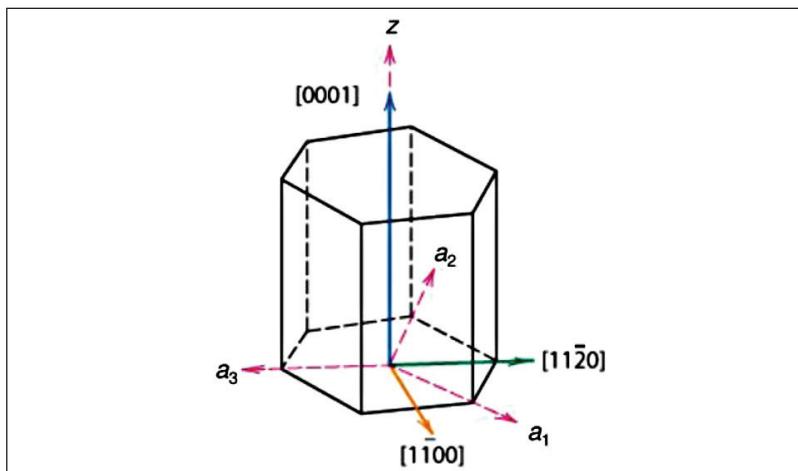
koordinat  $(\frac{4}{9}, \frac{5}{9}, \bar{1}, \frac{1}{9})$  tersebut. Penting untuk diketahui bahwa:

- Persamaan 2.1 tetap berlaku untuk indeks arah kristalografi pada struktur HCP.
- Indeks Miller-Bravais untuk arah kristalografi pada HCP  $[uvtw]$  juga kerap diekspresikan dalam bentuk indeks Miller dengan tiga angka  $[UVW]$ . Korelasi antara  $[uvtw]$  dan  $[UVW]$  dapat dilihat pada Persamaan 2.2, 2.3, dan 2.4. Gambar 22 memperlihatkan contoh indeks Miller-Bravais untuk arah kristalografi pada struktur HCP. Coba terapkan langkah-langkah nomor 1 dan 2 ke arah-arah pada gambar tersebut untuk memastikan pemahaman yang baik terhadap tata cara penamaan arah-arah kristalografi dengan indeks Miller-Bravais di struktur HCP.

$$u = \frac{1}{3} (2U - V) \quad \text{Persamaan 2.2}$$

$$v = \frac{1}{3} (2V - U) \quad \text{Persamaan 2.3}$$

$$w = W \quad \text{Persamaan 2.4}$$



Sumber: Callister & Rethwisch (2018)

**Gambar 22.** Contoh Indeks Miller-Bravais Arah Kristalografi pada Struktur HCP

## E. Difraksi Sinar-X dan Berkas Neutron

Sinar-X ditemukan pada 1895 oleh fisikawan Jerman bernama Wilhelm Konrad Röntgen saat menyelidiki efek berkas elektron (disebut juga sinar katoda) dalam pelepasan muatan listrik melalui gas bertekanan rendah. Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dari  $10^{-8}$  sampai  $10^{-12}$  meter, yang setara dengan frekuensi  $10^{16}$  sampai  $10^{20}$  hertz (Hz) (Bragg, 1907; Bragg, 1908; Bragg, 1910; Bragg, 1912; Friedrich dkk., 1912).

Ketika sinar-X ditembakkan ke kristal logam, atom-atom kristal akan menyebarkan sinar-X tersebut. Hamburan sinar-X ini terutama dilakukan oleh elektron-elektron pada atom hingga menghasilkan hamburan elastis (*elastic scattering*). Hamburan elastis terjadi ketika energi kinetik dari suatu partikel yang mengalami tumbukan terkonservasi pada titik pusat massa dari partikel walau arah penyebarannya berubah. Dengan kata lain, total energi kinetik dari sistem terkonservasi.

Gelombang sinar-X yang datang dan disebarluaskan oleh atom-atom kristal ada yang hilang karena gangguan destruktif (*destructive interference*) ketika puncak panjang gelombang bertemu dengan lembah panjang gelombang. Namun, ada juga yang mengalami gangguan konstruktif (*constructive interference*) saat dua puncak dari dua panjang gelombang bertemu. Arah dari sinar-X yang dipancarkan oleh atom bergantung pada sudut datang dari sinar-X, seperti terlihat pada Gambar 23. Difraksi terjadi ketika sinar-X yang datang terpantulkan dan mengalami gangguan konstruktif (tersinkronisasi) terhadap jarak antar-bidang atom d. Sinar-X yang dipantulkan ini kemudian membentuk pola atau spot refleksi yang disebut sebagai pola difraksi (*diffraction pattern*). Fisikawan, ahli kimia, sekaligus matematikawan asal Inggris, Sir William Henry Bragg, memformulasikan tata hubungan antara panjang gelombang sinar-X ( $\lambda$ ), sudut datang sinar-X ( $\theta$ ), dan jarak antar-bidang atom atau *interplanar spacing* ( $d$ ), yang dikenal dengan Hukum Bragg (Bragg's Law) seperti tertera pada Persamaan 2.5. Cara menghitung jarak antar-bidang ( $d$ ) berbasis indeks Miller tiga angka ( $hkl$ ) ditunjukkan pada Persamaan 2.6 untuk struktur kubik serta Persamaan 2.7 untuk struktur HCP.

$$n\lambda = 2ds\sin\theta \quad \text{Persamaan 2.5}$$

Di mana:

$n$  = bilangan bulat 1,2,3,...

$\lambda$  = panjang gelombang sinar-X

$\theta$  = sudut datang sinar-X

$d$  = jarak antar-bidang atom (*atomic interplanar spacing*)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2} \quad \text{Persamaan 2.6}$$

Di mana:

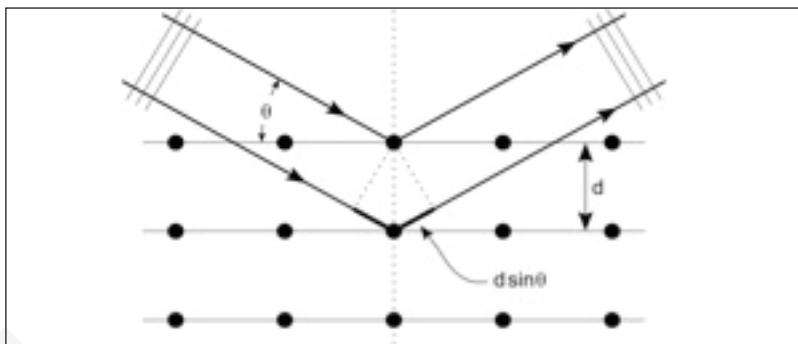
$a$  = panjang rusuk dari struktur kubik

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \frac{(h^2 + hk + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \text{Persamaan 2.7}$$

Di mana:

$a$  = panjang rusuk dari bidang basal pada struktur HCP

$c$  = jarak antar-bidang basal atau panjang sumbu tegak pada struktur HCP

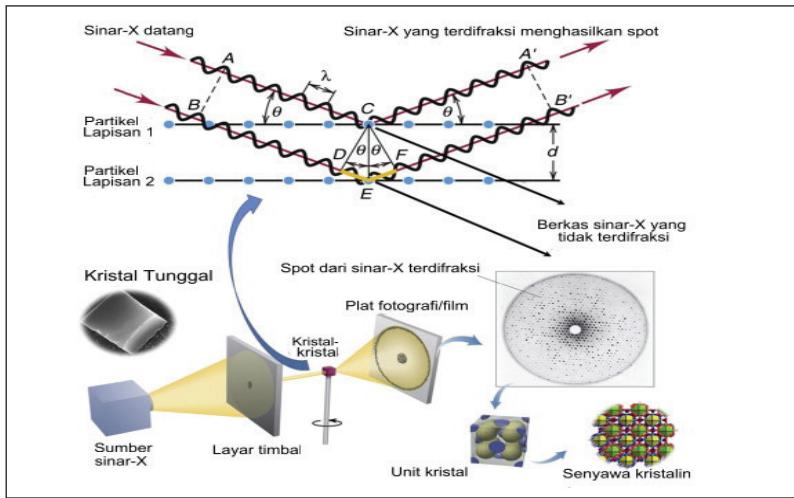


Sumber: Terzano dkk. (2019)

**Gambar 23.** Difraksi Sinar-X oleh Atom-Atom Kristal

Gambar 24 memperlihatkan mekanisme terbentuknya spot hasil difraksi sinar-X pada material berkristal tunggal. Sinar-X melewati layar timbal (Pb) menuju material berkristal tunggal, lalu dipantulkan atau terdifraksi ke lapisan film untuk membentuk kumpulan spot dengan pola tertentu. Prinsip inilah yang mendasari metode observasi tekstur kristalografi menggunakan sinar-X. Selain untuk tekstur kristalografi, difraksi sinar-X ini dimanfaatkan untuk menginvestigasi jenis fasa, kristalinitas, parameter kisi, tensor pemuaian (*expansion tensor*) dan modulus elastisitas, penentuan struktur kristal, pelebaran ukuran dan regangan, serta gugus-gugus atom yang tersusun secara periodik (Liu & Bashir, 2015). Kerapatan elektron pada kristal dikaitkan dengan pola difraksi menggunakan metode matematika transformasi Fourier (*Fourier transform*), yakni kerapatan tersebut dihitung dari pola difraksi.

Kerap terjadi juga hamburan sekunder (*secondary scattering*) dari sinar-X yang tidak terdifraksi saat pertama kali masuk ke spesimen. Potensi hamburan sekunder ini makin besar pada spesimen yang tebal dan bisa menghalangi analisis. Jika menggunakan berkas elektron (*electron beam*), hamburan sekunder bahkan bisa terjadi pada spesimen yang tipis. Sebagai solusi alternatif, berkas neutron (*neutron beam*) bisa juga digunakan untuk menghasilkan pola difraksi. Walaupun berbeda dengan elektron atau sinar-X, pola difraksi yang dihasilkan neutron dapat pula dianalisis dengan teknik pencitraan difraksi koheren yang sama. Sumber utama penghasil berkas neutron adalah reaktor nuklir. Karena tidak bermuatan, neutron lebih mudah terhambur dari inti atom dibandingkan dari elektron.



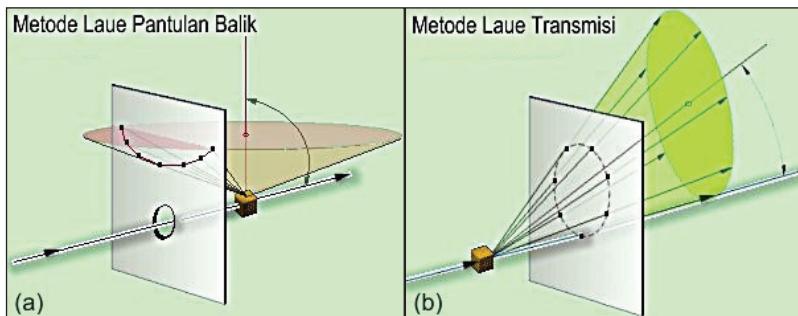
Sumber: Liu & Bashir (2015)

**Gambar 24.** Skema difraksi sinar-X oleh material berkrystal tunggal, interaksi spesimen dengan sinar-X, perbaikan data, serta analisis struktur kristal.

## F. Metode Laue

Metode Laue biasanya digunakan untuk menentukan orientasi dari material kristal tunggal, ketika radiasi sinar-X dipantulkan dari (*reflected from*) atau diteruskan melalui (*transmitted through*) kristal yang tetap atau stationer, seperti ditunjukkan oleh Gambar 24. Berkas sinar-X yang terdifraksi ini membentuk kumpulan spot atau titik di permukaan lapisan film. Sudut Bragg bersifat tetap untuk setiap set bidang di dalam kristal. Setiap set bidang ini menerima dan mendifraksi panjang gelombang tertentu dari berkas sinar-X yang datang dan memenuhi hukum Bragg (Persamaan 2.5), untuk jarak antar-bidang atom (d) yang dilingkupinya.

Metode Laue pantulan balik (*back-reflection Laue*) adalah jenis metode Laue ketika lapisan film diletakkan di antara sumber sinar-X dengan kristal, seperti terlihat pada Gambar 25a. Deretan spot atau titik yang membentuk kurva hiperbola pada lapisan film ini adalah refleksi dari bidang-bidang dalam zona yang sama serta dari satu permukaan kerucut imajiner pada Gambar 25a. Jenis metode Laue lainnya adalah



Ket.: (a) Metode Laue pantulan balik, dan (b) metode Laue transmisi.

Sumber: The Laue method. (t.t.)

### Gambar 25. Jenis Metode Laue

metode Laue transmisi (*transmission Laue*), di mana posisi lapisan film berada di belakang kristal, seperti terlihat pada Gambar 25b. Permukaan kerucut imajiner yang terbentuk pada Gambar 25b adalah kumpulan dari sinar-X yang diteruskan oleh kristal. Ketika diletakkan di belakang kristal, lapisan film memotong permukaan kerucut imajiner dan membentuk pola spot-spot atau titik-titik berbentuk elips. Metode Laue pantulan balik ataupun transmisi menjadi dasar bagi desain alat observasi tekstur kristalografi, yaitu XRD *goniometer* dan konsep proyeksi stereografik.

## G. Elektron Hamburan Balik (*Backscattered Electron*)

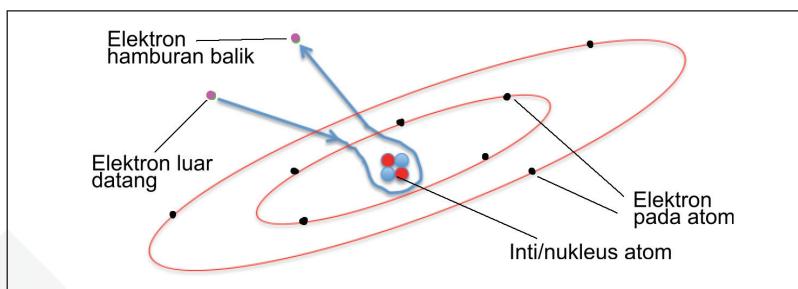
Ketika berkas elektron mengenai spesimen, seperti pada mekanisme *scanning electron microscopy* (SEM), beberapa elektron dapat berinteraksi dengan inti atau nukleus atom dari material spesimen. Elektron yang bermuatan negatif tertarik ke inti bermuatan positif (proton). Pada kondisi dan sudut tertentu, elektron ini bisa saja tidak jatuh tertarik ke proton, tetapi hanya mengitari inti atom dan keluar dari spesimen tanpa melambat sedikit pun. Elektron inilah yang disebut sebagai elektron hamburan balik (*backscattered electron*) karena keluar kembali dari spesimen dengan kecepatan tinggi serta lintasan balik berbentuk garis lurus. Elektron hamburan balik ini kemudian ditangkap oleh detektor serta diproses untuk menghasilkan citra di layar. Jumlah elektron hamburan balik berbanding lurus dengan ukuran inti atom, sehingga dapat

dipergunakan untuk menghasilkan citra dari berbagai elemen dengan variasi ukuran inti atom. Gambar 26 menunjukkan mekanisme terjadinya elektron hamburan balik. Gambar 27 memperlihatkan diagram kutub logaritmik dari penampang hamburan elektron elastis dari atom karbon (C) dan emas (Au), berdasarkan pada perhitungan fisikawan Ernest Rutherford serta koreksi penambahan potensi Coulumb oleh G. Wentzel (Wentzel, 1926; Niedrig, 1978).

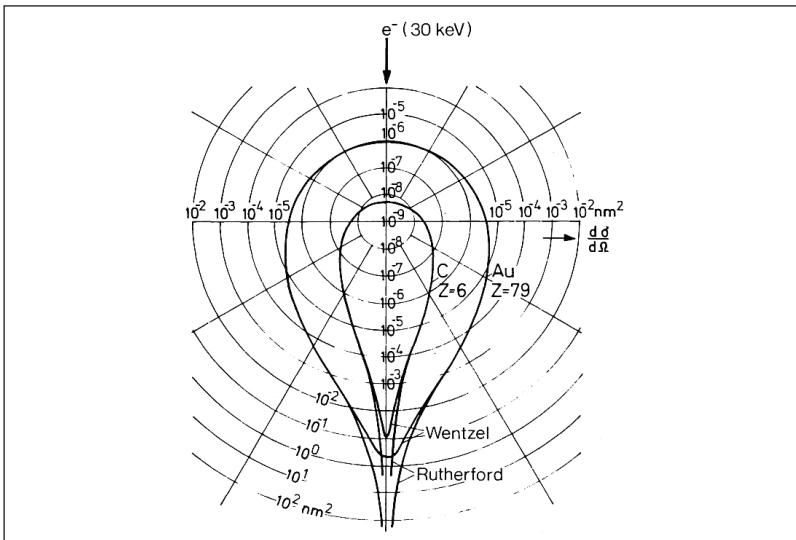
## H. Alat Observasi untuk Analisis Tekstur Kristalografi

### 1. Makrotekstur

Alat yang digunakan untuk observasi difraksi sinar-X atau hamburan neutron yang kemudian diolah dan dianalisis menjadi makrotekstur (*pole figures, inverse pole figures, dan FDO*) adalah *goniometer*. Paten pertama kali untuk invensi alat *goniometer* untuk difraksi sinar-X (XRD) terdaftar dengan nama Nills Tryggve A Baak dan Robert H Simmons dari Owens-Illinois Inc, Ohio, Amerika Serikat, dengan nomor paten US3322948A pada 1967 (Baak & Simmons, 1967). Paten ini menunjukkan invensi pertama *goniometer* dengan spesimen yang diam/tetap (*stationary*), sedangkan sumber dan detektor sinar-X bisa bergerak. Perkembangan alat *goniometer* ini selanjutnya menghasilkan paten oleh Shigeru Munekawa dari Rigaku Denki Kabushiki Kaisha, Tokyo, Jepang, dengan nomor paten US4972448A pada 1990 (Munekawa, 1990). Perbedaan invensi pada paten tahun 1990 dengan paten tahun 1967 adalah pada paten 1990 spesimen ataupun sumber sinar-X serta detektor sinar-X kini dapat bergerak secara bebas relatif satu sama lain.



**Gambar 26.** Mekanisme Terjadinya Elektron Hamburan Balik



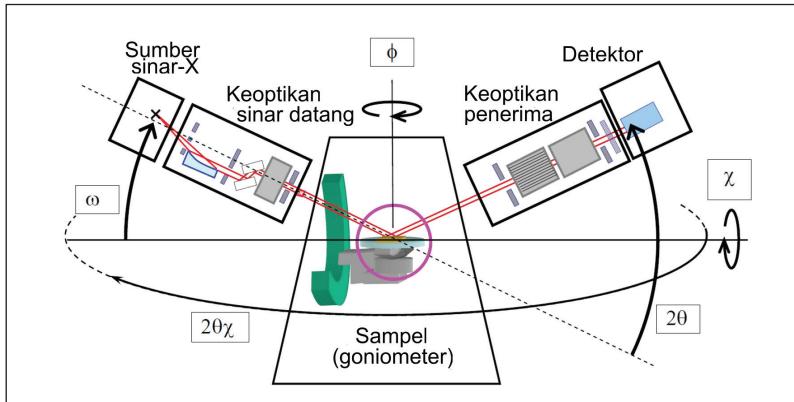
Sumber: Niedrig (1978)

**Gambar 27.** Diagram Kutub Logaritmik Penampang Hamburan Elektron Elastis dari Atom Karbon (C) dan Emas (Au)

Alat *goniometer XRD* diklasifikasi menjadi dua tipe bergantung pada bidang tempat keberadaan lingkaran difraktometer. Pertama adalah *goniometer XRD* lateral dengan lingkaran difraktometer berada pada bidang horizontal. Kedua adalah *goniometer XRD* vertikal untuk lingkaran difraktometer yang berada pada bidang vertikal. Gambar 28 menunjukkan skema *goniometer XRD* lateral lima-lingkaran (*five-circle lateral XRD goniometer*). Disebut lima-lingkaran karena spesimen dapat bergerak dalam tiga sudut putaran ( $\omega$ ,  $\chi$ ,  $\phi$ ) dan detektor dalam dua sudut putaran ( $2\theta$  and  $2\theta\chi$ ). Gambar 29a memperlihatkan contoh alat *goniometer XRD* lateral, dan Gambar 29b alat *goniometer XRD* vertikal.

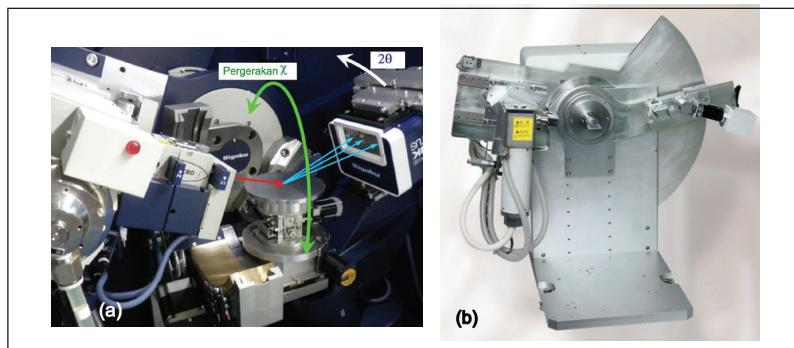
Bergantung pada fitur, spesifikasi, serta kelengkapan alat *goniometer XRD*, pengolahan dan analisis data tekstur kristalografi membutuhkan program aplikasi, baik *built-in* maupun terpisah. Program aplikasi ini bekerja berbasis metode Rietveld (Rietveld, 1969). Metode Rietveld menyesuaikan profil terhitung dari parameter-parameter struktur dan instrumen ukur dengan data eksperimen. Penyesuaian ini menggunakan metode kuadrat terkecil non-linier (*non-linear least square method*).

od) serta memerlukan perkiraan awal logis dari parameter-parameter bebas, seperti bentuk puncak-puncak difraksi, dimensi sel satuan, dan koordinat atom-atom dalam struktur kristal. Beberapa contoh aplikasi pengolah data *goniometer XRD* dan neutron untuk tekstur kristalografi adalah MAUD, ATEX, Exponent Connect, dan MaZda.



Sumber: Inaba dkk. (2013)

**Gambar 28.** Ilustrasi skematis tentang sistem *goniometer XRD* lateral lima lingkaran.



Sumber: Inaba dkk. (2013); C141-E006F XRD-7000 (t.t.)

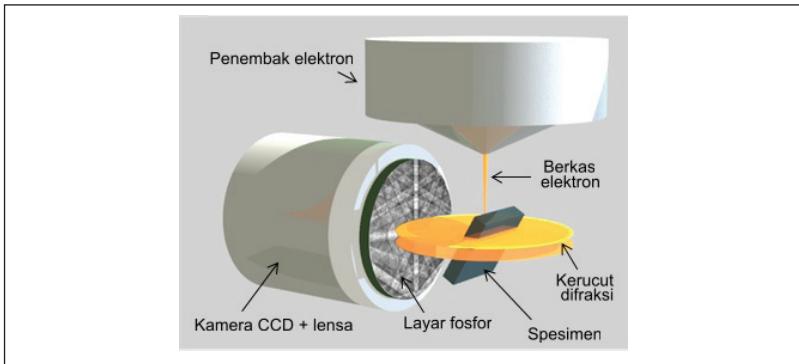
**Gambar 29.** (a) *Goniometer XRD* lateral, dan (b) *goniometer XRD* vertikal

## 2. Mikrotekstur

Alat yang digunakan untuk menginvestigasi mikrotekstur, yang berbasis elektron hamburan balik, adalah *electron backscatter diffraction* (EBSD) yang terintegrasi dengan *scanning electron microscope* (SEM). Selain untuk mikrotekstur, EBSD dapat digunakan untuk menginvestigasi jenis fasa (Schwartz dkk., 2009) serta regangan (Wright dkk., 2011). Elektron hamburan balik yang keluar dari spesimen ditangkap oleh detektor EBSD (Gambar 30) yang dilengkapi dengan layar fosfor (P) berpendar untuk menghasilkan pola Kikuchi (*Kikuchi pattern*), seperti terlihat pada Gambar 31.

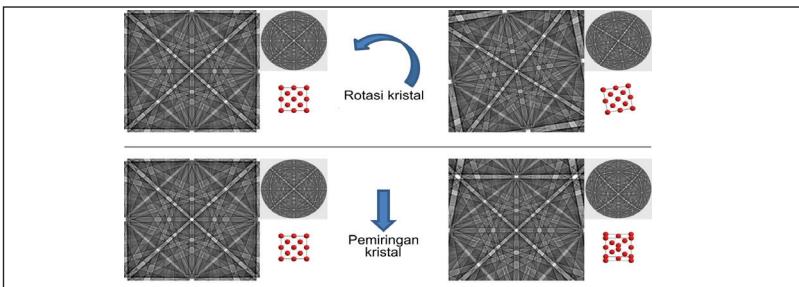
Garis-garis Kikuchi (Gambar 31) adalah pola-pola hamburan elektron. Pola-pola ini berpasangan dan membentuk pita-pita difraksi elektron, yang berfungsi sebagai “jalan penghubung” antarspot difraksi. Pola Kikuchi adalah pola difraksi yang dihasilkan oleh pantulan Bragg dari elektron yang terhambur secara inelastis di dalam spesimen. Karena elektron-elektron yang terhambur secara inelastis ini tersebar dalam jangkauan sudut-sudut difraksi besar, pantulan Bragg tidak membentuk spot atau titik, tetapi pasangan garis ekses dan garis cacat (garis-garis Kikuchi) oleh bidang-bidang  $(hkl)$  dan  $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ . Garis-garis Kikuchi berintensitas rendah (cacat) terbentuk di area yang dekat dengan berkas datang, sedangkan garis-garis Kikuchi berintensitas tinggi (ekses) terjadi pada area yang jauh dari berkas datang, seperti terlihat pada Gambar 32. Ketika pantulan orde rendah dari bidang-bidang  $(hkl)$  dan  $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$  tereksitasi secara kuat, pita atau pasangan dua garis Kikuchi berintensitas tinggi (ekses) terbentuk di antara dua pantulan tersebut sebagai konsekuensi dari efek difraksi dinamis yang kuat.

Perbedaan pola Kikuchi dengan spot difraksi (Gambar 33) adalah pada pola Kikuchi, tidak hanya terlihat kutub-kutub (*poles*), tetapi juga pita-pita (*bands*) penghubung antar kutub. Gambar 34 memperlihatkan contoh produk detektor EBSD.



Sumber: Electron backscatter diffraction (EBSD) (t.t.)

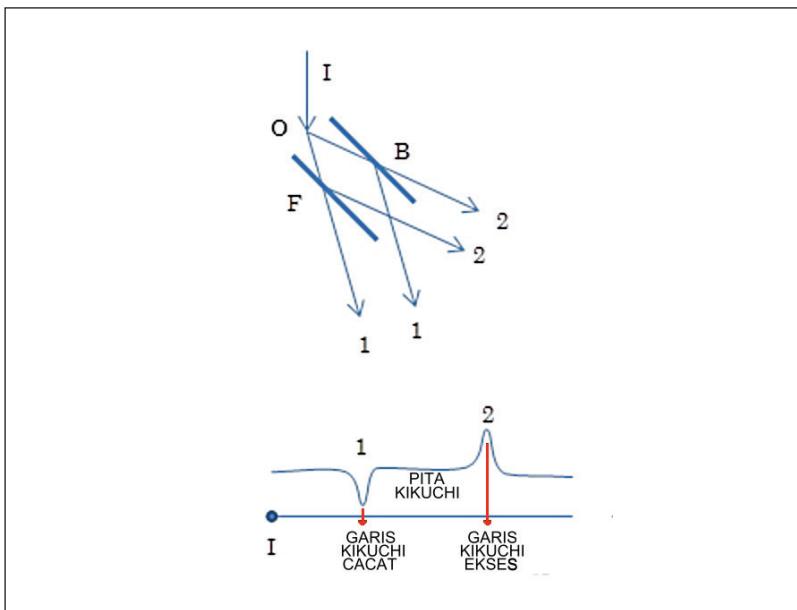
**Gambar 30.** Prinsip Kerja Detektor EBSD



Sumber: Electron Backscatter Diffraction (EBSD) (t.t.)

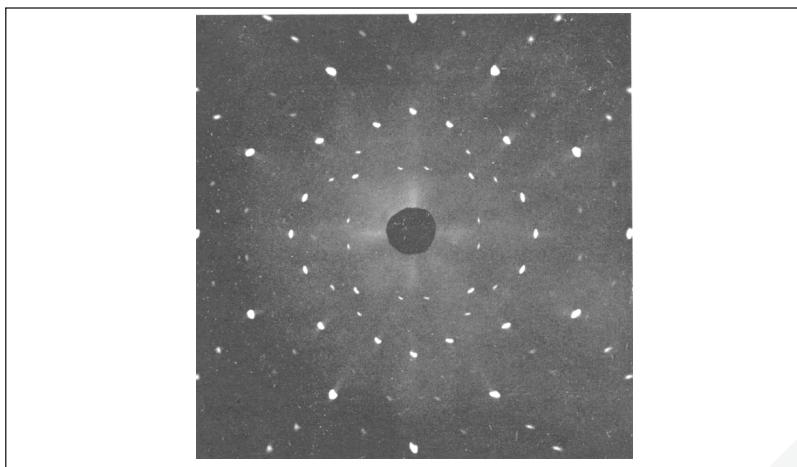
**Gambar 31.** Pola Kikuchi dari Silikon (Si) Kristal Tunggal

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Kikuchi pattern (t.t.)

**Gambar 32.** Mekanisme Terbentuknya Garis Kikuchi dan Pita Kikuchi



Sumber: Lee (2013)

**Gambar 33.** Spot Difraksi

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: QUANTAX EBSD Detector e-FlashFS (t.t.)

**Gambar 34.** Contoh Produk Detektor SEM-EBSD

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB III

## Proyeksi Stereografik, *Pole Figures*, dan *Inverse Pole Figures*

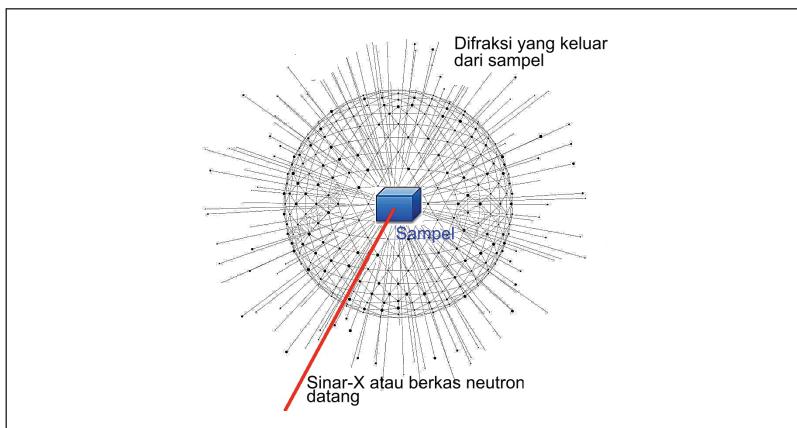
Difraksi sinar-X atau hamburan neutron pada material kristalin menghasilkan *spot-spot* berpola (*patterned spots*) di lapisan film pada teknik konvensional. Dewasa ini, data pola difraksi yang tertangkap dan diproses oleh detektor goniometer dapat ditampilkan di layar digital. Hamburan balik dari elektron yang ditembakkan ke material kristalin menghasilkan pola Kikuchi yang tertangkap oleh layar fosfor berpendar pada detektor SEM-EBSD. Apa pun sumber difraksi yang digunakan (sinar-X, hamburan neutron, ataupun hampuran elektron), saatnya kini data difraksi tersebut dianalisis ke dalam bentuk *pole figures* dan/atau *inverse pole figures*.

### A. Proyeksi Stereografik

Bayangkan sebuah bola imajiner melingkupi sebuah spesimen. Saat spesimen atau sampel tersebut ditembak dengan sinar-X atau berkas neutron, difraksi yang terjadi memancar ke berbagai arah dan menembus bola imajiner tersebut dari dalam, seperti terlihat pada Gambar 35. Kumpulan titik di permukaan bola, yang menjadi lokasi-lokasi tembus

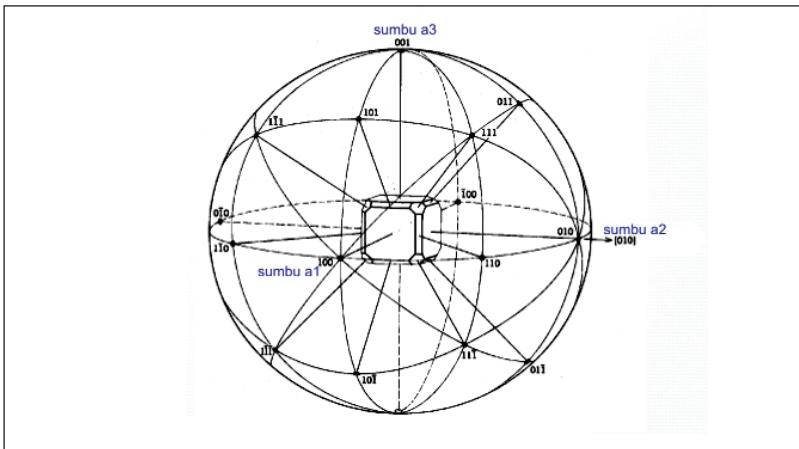
garis difraksi, memiliki signifikansi tersendiri karena mereka merepresentasikan bidang-bidang serta arah-arah kristalografi pada spesimen yang menghasilkan difraksi tersebut. Analogi dengan bola imajiner tersebut, ketika sebuah kristal logam yang isometrik terkena sinar-X atau berkas neutron dari arah, contohnya  $\langle 100 \rangle$ , pantulan difraksi yang dihasilkan oleh beberapa bidang kristalografi mengikuti prinsip yang sama dengan yang tertera pada Gambar 35 dan dapat dilihat pada Gambar 36.

Pada Gambar 36, kumpulan titik dari pola difraksi di permukaan bola merupakan lokasi tembus dari arah-arah kristalografi yang tegak lurus dengan bidang-bidang kristalografi dengan indeks Miller serupa. Seperti diketahui, bidang  $\{111\}$  tegak lurus ( $\perp$ ) dengan arah  $\langle 111 \rangle$ , bidang  $\{100\}$  tegak lurus dengan arah  $\langle 100 \rangle$ , dan seterusnya. Dengan kata lain, arah kristalografi  $\langle hkl \rangle$  adalah arah normal dari bidang kristalografi  $\{hkl\}$  yang memiliki angka indeks yang sama. Lebih mudah dipahami jika kristal isometrik pada Gambar 36 divisualisasikan juga sebagai sel satuan (*unit cell*), sehingga garis-garis difraksi yang tertera notasinya dapat dikaitkan dengan bidang-bidang kristalografi dari sel satuan tersebut.



Sumber: Vector Polygon Mesh Planet Radiating, Lines And Dots Internationalization globalization 3D (t.t.)

**Gambar 35.** Difraksi dan Bola Imajiner



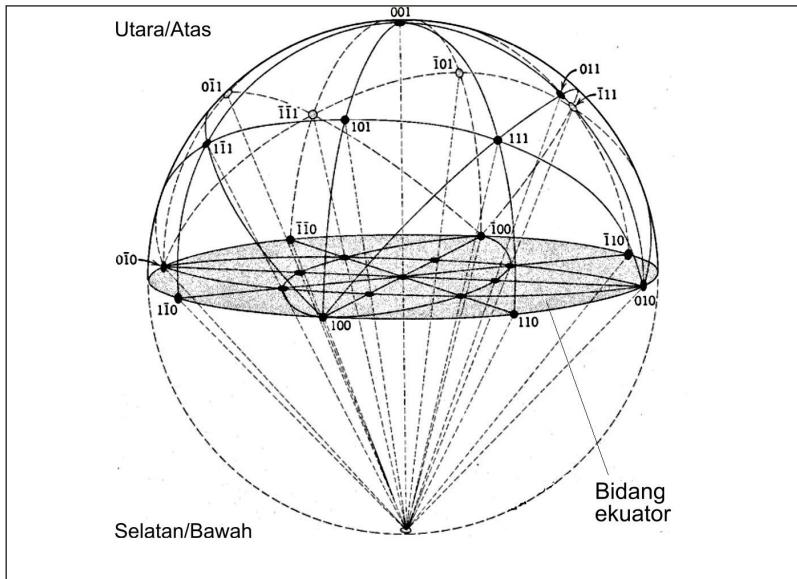
Ket.: Lebih mudah dipahami jika kristal isometrik di bagian tengah divisualisasikan sebagai sel satuan.

Sumber: Stereographic Projection Crystallography (t.t.)

**Gambar 36.** Kristal isometrik beserta pola difraksinya di permukaan bola imajiner.

Untuk membuat proyeksi stereografik, pola difraksi pada permukaan bola tersebut perlu ditransfer ke bidang dua dimensi, yaitu bidang ekuator dari bola imajiner. Cara melakukannya adalah jika pola difraksi tersebut berada di belahan bola utara (*northern hemisphere*) atau belahan bola atas, tarik garis lurus dari pola difraksi tersebut ke kutub selatan bola. Perpotongan garis tersebut di bidang ekuator menjadi proyeksi stereografik dari pola difraksi tersebut, seperti terlihat pada Gambar 37. Analogi serupa berlaku untuk pola difraksi yang berada di *hemisphere* selatan dari bola.

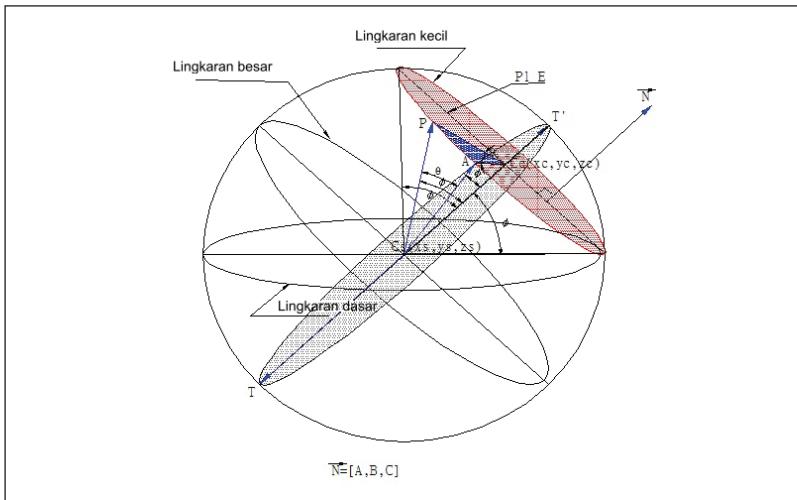
Untuk proyeksi stereografik pada bola imajiner, terdapat dua jenis lingkaran yang terproyeksi ke bidang ekuator, yaitu lingkaran besar dan lingkaran kecil (Gambar 38). Lingkaran besar adalah lingkaran yang memiliki ukuran diameter sama dengan diameter bola imajiner. Lingkaran kecil adalah lingkaran dengan ukuran diameter kurang dari diameter bola imajiner.



Sumber: Klein & Dutrow (2007)

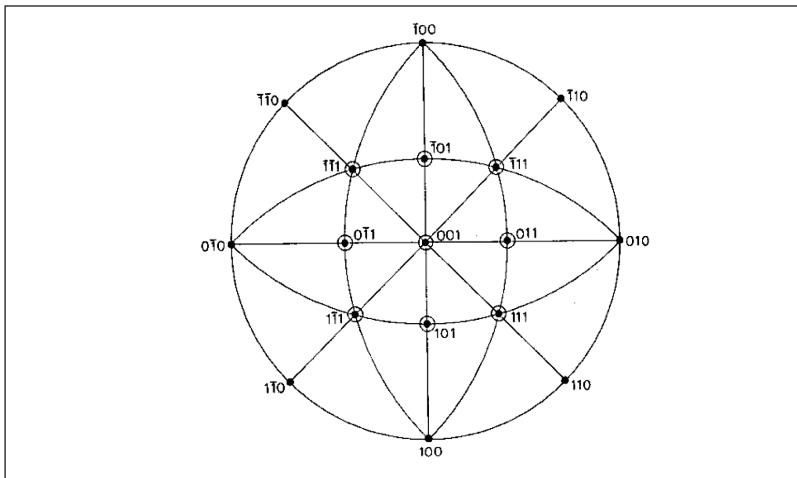
**Gambar 37.** Proyeksi Pola Difraksi dari Permukaan Bola Belahan Utara/Atas ke Bidang Ekuator

Proyeksi pola difraksi pada permukaan bola imajiner ke bidang ekuator menghasilkan gambar atau citra yang disebut *stereogram*. Gambar 39 memperlihatkan *stereogram* dari bidang-bidang utama untuk sistem kristal kubik, yang juga merupakan lanjutan dari proyeksi stereografik dari Gambar 36 dan Gambar 37. Perhatikan bahwa kutub 100 berada di ujung bawah dari *stereogram*, yang merupakan arah datangnya sinar-X atau berkas neutron ke spesimen di dalam bola imajiner. Kutub 001, yang tadinya berada di ujung atas (kutub utara) dari bola imajiner, kini menjadi kutub pusat (*center pole*) dari *stereogram* ini.



Sumber: Ching-Her (2019)

**Gambar 38.** Lingkaran Besar dan Lingkaran Kecil pada Bola Imaginer



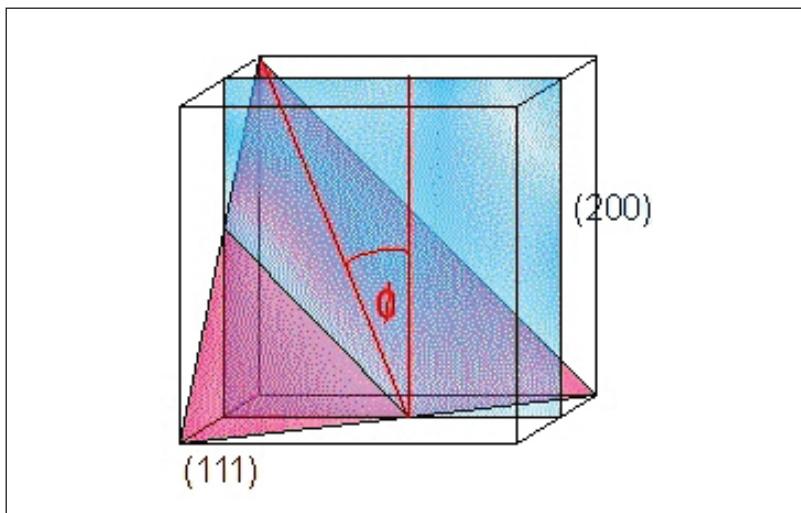
Sumber: Quncheng & Jiachen (2018)

**Gambar 39.** Stereogram dengan Kutub Pusat 001 Hasil Proyeksi Stereografik

## B. Pengukuran Sudut Antarkutub Bidang Menggunakan Jaring Wulff (*Wulff Net*)

Sudut dihedral ( $\phi$ ) antara dua bidang kristalografi  $(h_1 k_1 l_1)$  dan  $(h_2 k_2 l_2)$  pada suatu sel satuan dalam sistem kristal kubik dapat dihitung atau diukur. Perhitungan sudut tersebut mengikuti Persamaan 3.1, yang juga berlaku untuk perhitungan sudut antara dua arah (vektor) yang tegak lurus (normal) terhadap kedua bidang yang dimaksud, yaitu  $[h_1 k_1 l_1]$  dan  $[h_2 k_2 l_2]$ .

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} \quad \text{Persamaan 3.1}$$



Sumber: Calculating angle (t.t.)

**Gambar 40.** Sudut Dihedral  $\phi$  antara Bidang (111) dan (200)

Gambar 40 memperlihatkan contoh perhitungan sudut  $\phi$  antara bidang (111) dan (200). Dengan menggunakan Persamaan 3.1, perhitungan sudut  $\phi$  antara bidang (111) dan (200) pada Gambar 40 adalah

$$\begin{aligned}
 \cos \phi &= \frac{(1 \times 2) + (1 \times 0) + (1 \times 0)}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} \sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} \\
 &= \frac{2+0+0}{\sqrt{3}\sqrt{4}} \\
 &= \frac{2}{2\sqrt{3}} \\
 \cos \phi &= \sqrt{3} \\
 \therefore &= 54,73561^\circ
 \end{aligned}$$

Sudut dihedral ( $\phi$ ) di antara dua bidang juga dapat diukur pada *stereogram*. Seperti dibahas pada subbab A di Bab III, indeks Miller dari bidang kristalografi (hkl) serta arah kristalografi yang tegak lurus dengannya [hkl] kini telah menjadi kutub (*pole*) (Gambar 39). Besar sudut antara dua kutub pada *stereogram* yang berarti juga sudut dihedral ( $\phi$ ) antara dua bidang kristalografi, adalah panjang garis penghubung antara dua kutub tersebut.

Untuk mengukur sudut dihedral ( $\phi$ ) pada *stereogram*, digunakan alat bantu yang disebut jaring Wulff (*Wulff net*) seperti terlihat pada Gambar 41. Jaring Wulff ini, dengan tampilan menyerupai millimeter blok, memiliki kotak satuan yang memiliki besaran atau nilai  $2^\circ$ . Jaring Wulff ini diletakkan tepat di atas *stereogram*, dengan diameter jaring Wulff harus sama dengan diameter *stereogram* (Gambar 42). Pada teknik konvensional, jaring Wulff biasanya disalin terlebih dulu ke plastik transparan agar *stereogram* tetap terlihat saat jaring Wulff diletakkan di atasnya. Pada titik pusat (*center point*) jaring Wulff, ditancapkan jarum agar jaring Wulff dapat diputar  $360^\circ$  searah ataupun berlawanan arah jarum jam di atas *stereogram*. Dengan kemajuan teknologi, proses pemutaran jaring Wulff di atas *stereogram* kini dapat dilakukan dengan bantuan citra dan program komputer.

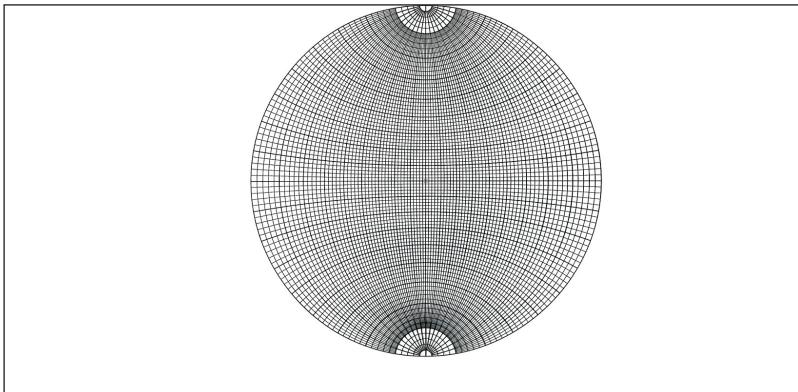
Ketika peletakan pertama di atas *stereogram* telah dilakukan, terlihat beberapa kutub langsung terhubung dengan garis-garis pada jaring

Wulff. Panjang garis penghubung kemudian dihitung berdasarkan pada banyaknya kotak satuan yang tercakup oleh garis tersebut lalu dikalikan dengan  $2^\circ$ . Hasil perhitungan inilah yang menunjukkan besar sudut di antara dua kutub atau dua bidang kristalografi. Untuk kutub-kutub pada *stereogram* yang belum terhubung langsung dengan garis-garis pada jaring Wulff pada saat peletakan pertama, jaring Wulff perlu diputar (searah atau berlawanan arah jarum jam) sedemikian rupa hingga akhirnya kutub-kutub tersebut terhubung oleh garis-garis pada jaring Wulff.

Perbedaan antara pengukuran sudut di antara dua bidang kristalografi menggunakan jaring Wulff dan perhitungan menggunakan Persamaan 3.1 adalah nilai yang diperoleh dengan jaring Wulff tidak se-akurat dibandingkan Persamaan 3.1. Hal ini terjadi karena jaring Wulff memiliki kotak satuan terkecil hanya sampai  $2^\circ$ , sehingga pengukuran panjang garis yang ujungnya jatuh di tengah kotak satuan terkecil tersebut hanya bisa dikira-kira. Gambar 43 memperlihatkan contoh pengukuran sudut antara kutub 101 dan 011 dengan cara memutar jaring Wulff searah jarum jam sampai kedua kutub tersebut terhubungkan oleh garis (ditandai warna biru) pada jaring Wulff.

### C. Simetri Kristal pada Stereogram

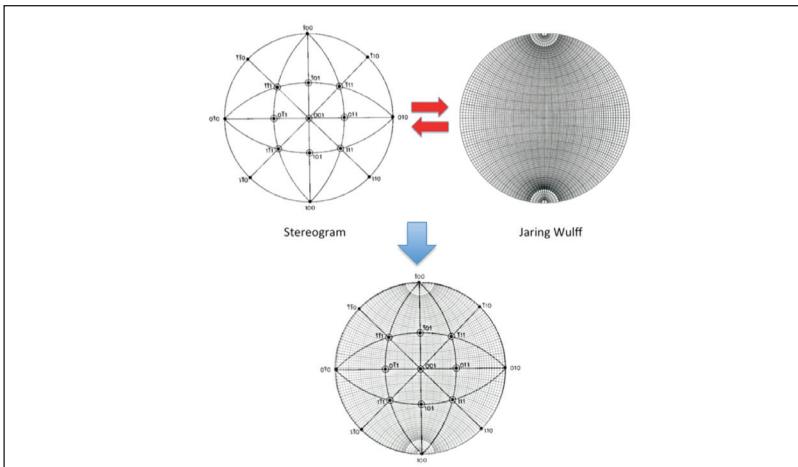
Pada Subbab C di Bab II telah dibahas tentang berbagai simetri pada kristal. Tabel 3 merekapitulasi varian simetri berbasis rotasi tepat (*proper rotation*) dan rotasi tidak tepat (*improper rotation* atau *roto-inversion*) beserta simbolisasinya. Kini simetri-simetri kristal tersebut diimplementasikan pada *stereogram*. Gambar 44 menunjukkan *stereogram* 001 dengan kutub-kutub utama beserta jenis simetrinya. Terlihat bahwa kelompok bidang {100} memiliki rotasi lipat -4 atau  $C_4$  dengan simbol ■. Kelompok bidang {110} memiliki rotasi lipat -2 atau  $C_2$  dengan simbol ● serta kelompok bidang {111} dengan *roto-inversion* bersimbol ▲. Gambar 44 memberi ilustrasi bagaimana simetri ▲ dari kelompok bidang {111} pada *stereogram* 001 adalah satu kelompok titik kristalografi tersendiri, begitu pun simetri ■ dari kelompok bidang {100} dan simetri ● dari kelompok bidang {110}.



Sumber: The Wulff Net (t.t.)

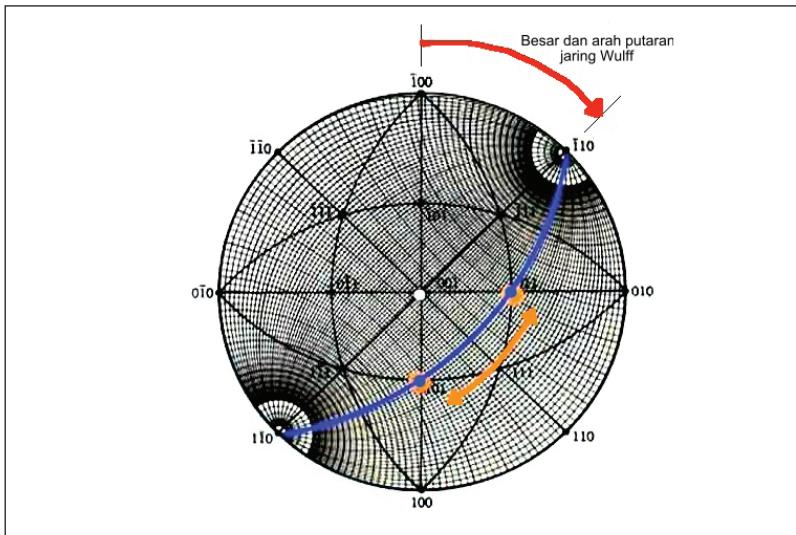
**Gambar 41.** Jaring Wulff

Tabel 2 merekapitulasi tujuh sistem kristal beserta simetrinya. Ketika rotasi tepat dan rotasi tidak tepat diimplementasikan pada tujuh sistem kristal tersebut, diperoleh 32 kelompok titik kristalografi (*crystallographic point groups*) yang unik. Gambar 45 memperlihatkan 32 kelompok titik kristalografi tersebut pada *stereogram*.



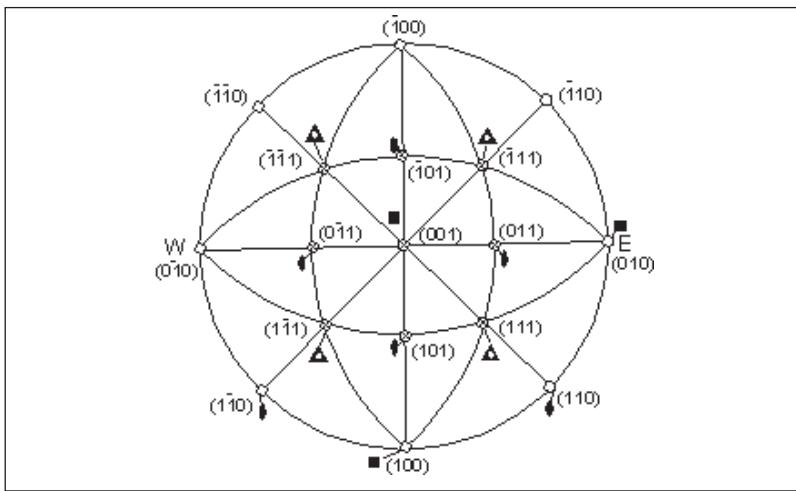
Sumber: Quncheng & Jiachen (2018); The Wulff Net (t.t.)

**Gambar 42.** Tumpang-tindih jaring Wulff dengan *stereogram* untuk pengukuran sudut di antara dua kutub (*poles*).



Sumber: bhadeshia123 (2012)

**Gambar 43.** Contoh Pengukuran Sudut antara Kutub 101 dan 011



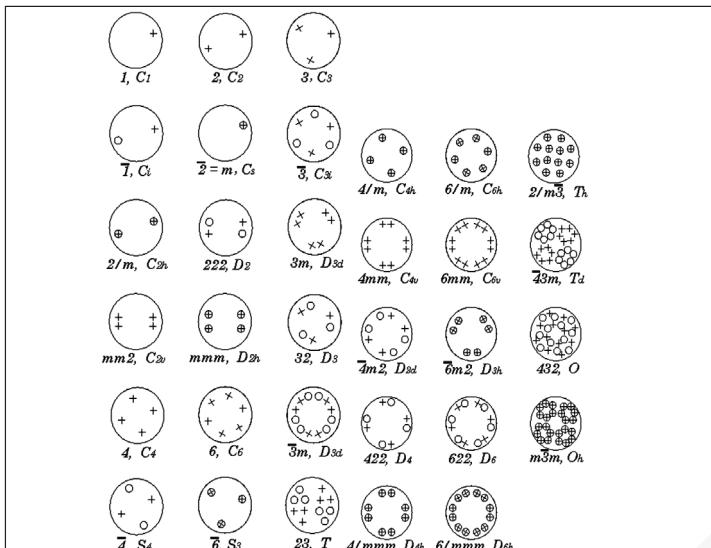
Sumber: Nelson (2014)

**Gambar 44.** Simetri rotasi tepat (*proper rotation*) dan rotasi tidak tepat (*improper rotation* atau *roto-inversion*) dari kelompok bidang {100}, {110}, dan {111} pada stereogram 001.

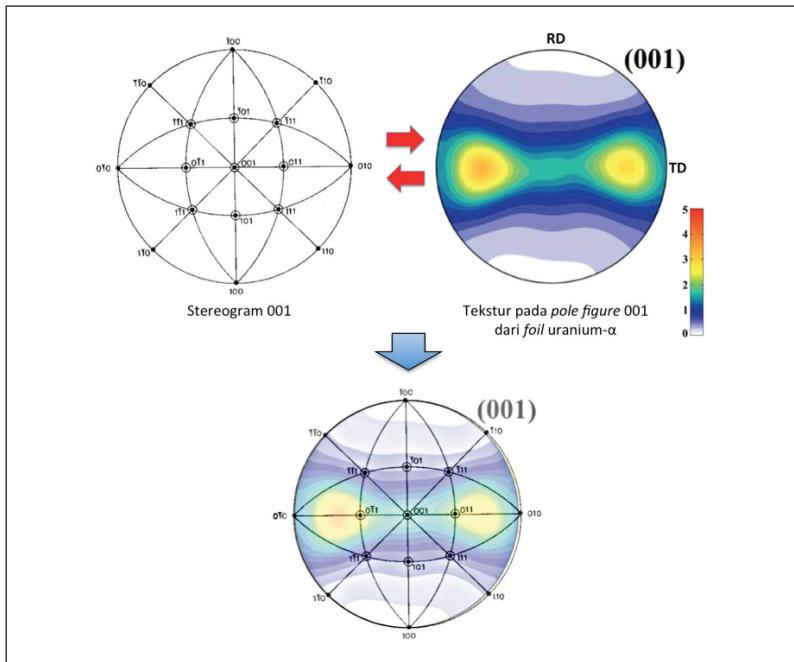
## D. Pole Figures

Jika dikaitkan dengan *stereogram* sebagai hasil dari proyeksi stereografik, *pole figure* merepresentasikan penyebaran orientasi dari bidang kristalografi pada *stereogram* untuk analisis tekstur kristalografi. *Pole figure* adalah representasi grafis dua dimensi pada *stereogram* dari orientasi yang menunjukkan orientasi bidang normal atau *pole* yang dipilih terkait kerangka referensi suatu spesimen (Bassani dkk., 2005). Orientasi bidang normal di sini tidak tunggal atau titik, tetapi berupa tekstur di sekitar orientasi tertentu. Tekstur dapat didefinisikan sebagai penyebaran orientasi secara kontinu dengan tingkatan kontur (*contour levels*) yang menunjukkan intensitas tekstur sebagai frekuensi kejadian yang bersifat acak atau random.

Gambar 46 memperlihatkan *stereogram* 001 yang ditumpang-tindihkan dengan *pole figure* 001 dari tekstur kristalografi *foil* uranium- $\alpha$  hasil difraksi hamburan neutron (Einhorn dkk., 2017). Tumpang-tindih ini memberi contoh ilustrasi bagaimana makrotektur *foil* uranium- $\alpha$  dapat dianalisis orientasinya terhadap bidang-bidang kristalografi utama pada *stereogram*.

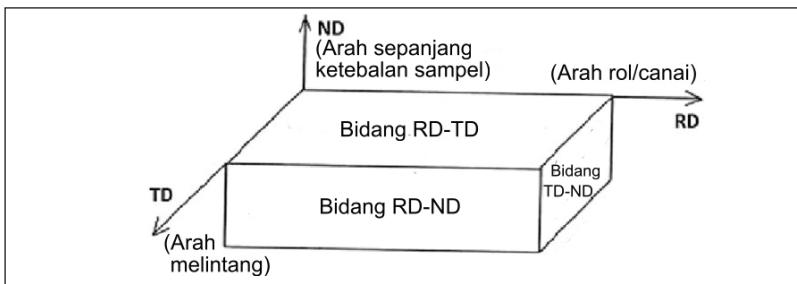


Selain orientasi kristal atau tekstur, pada *pole figure* terdapat informasi kerangka referensi atau sumbu koordinat spesimen. Pada *pole figure* di Gambar 46, informasi tersebut tertulis sebagai RD dan TD. RD adalah *rolling direction* atau arah canai/arah rol, sedangkan TD singkatan dari *transverse direction* atau arah melintang. Ada satu arah lagi yang tidak tertulis di *pole figure* tersebut, yaitu arah ND atau *normal direction*. Arah ND pada *pole figure* tersebut adalah arah yang tegak lurus dengan *pole figure* tepat di titik tengah (*center pole*). Gambar 47 memperlihatkan kerangka RD, TD, dan ND pada spesimen berbentuk balok atau kubus. Dengan menunjukkan arah TD-RD-ND pada *pole figure*, keterkaitan antara orientasi kristal pilihan (*preferred crystal orientations*) dan kerangka acuan spesimen makin jelas.



Sumber: Einhorn dkk. (2017)

**Gambar 46.** Stereogram 001 dan *pole figure* 001 dari makrotekstur *foil* uranium- $\alpha$  hasil difraksi hamburan neutron.



Sumber: Mondal dkk. (2013)

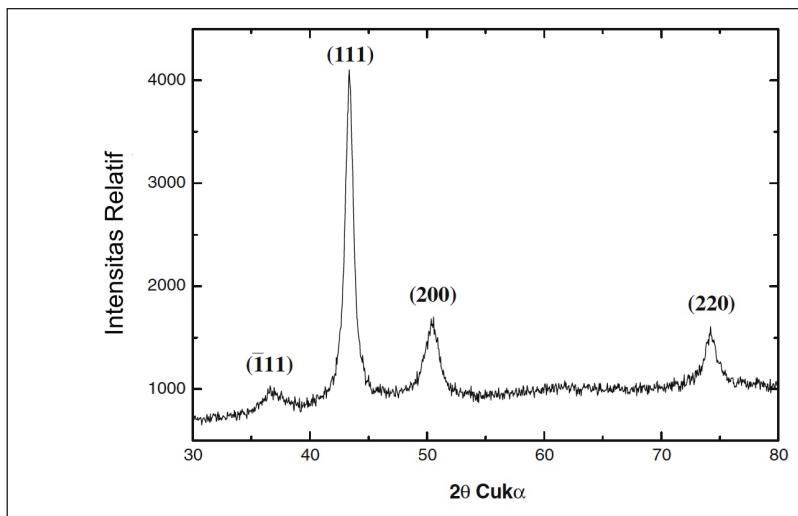
**Gambar 47.** Arah RD-TD-ND pada Spesimen

Penting untuk diketahui dan dipahami bahwa sebelum tekstur kristalografi suatu spesimen material diobservasi dengan alat *goniometer*, perlu dilakukan dulu pengukuran puncak-puncak utama XRD (*XRD peaks*) dari unsur atau senyawa “*of interest*” material tersebut pada kondisi padatan serbuk (*green compact*) atau coran (*as-cast*). Sudut  $2\theta$  dari puncak-puncak utama tersebut pada difraktogram menjadi referensi bagi observasi tekstur kristalografi, dengan menganalisis pergeseran orientasi kristal spesimen dari kondisi tidak atau minim terorientasi (serbuk atau coran). Sudut  $2\theta$  dari puncak-puncak utama tersebut di-*input* ke dalam alat *goniometer* sebelum pengukuran tekstur dilakukan. Selain sudut  $2\theta$ , data penting lainnya yang dibutuhkan adalah struktur kristal beserta nilai parameter kisi (*lattice parameters*) dari unsur atau senyawa “*of interest*”. Struktur kristal dan parameter kisi ini bisa dianalisis dari olahan data difraktogram XRD serta dibutuhkan saat data mentah dari hasil pengukuran tekstur akan diolah oleh program aplikasi atau *software* analisis tekstur. Pengukuran sudut  $2\theta$ , struktur kristal, dan parameter kisi ini cukup dilakukan sekali saja di awal untuk unsur atau senyawa “*of interest*” tertentu. Gambar 48 menunjukkan contoh puncak-puncak utama dari difraktogram nanopartikel tembagga (Cu) (Raffi dkk., 2010).

## E. Komponen-Komponen Tekstur (*Texture Components*)

Selain referensi puncak-puncak utama pada sudut  $2\theta$  seperti dibahas pada Subbab D di Bab III ini, analisis tekstur kristalografi juga kerap melibatkan referensi komponen tekstur. Penggunaan komponen tek-

stur ini dimulai ketika studi tekstur masih tahap awal, saat *pole figure* hasil eksperimen dan prediksi masih sebagian besar ditafsirkan dalam istilah evolusi dan signifikansi fisik komponen tekstur yang diskrit (Wassermann & Grewen, 1962), kemudian berkembang menjadi simulasi berbasis fungsi pemodelan Gauss dan Lorentz dengan referensi orientasi ruang (Luecke dkk., 1981; Luecke dkk., 1986; Matthies, 1982; Helming & Eschner, 1990; Helming dkk., 1994; Helming, 1996; Eschner & Fundenberger, 1997). Istilah-istilah teknis yang diperkenalkan pertama kali pada akhir dekade 1960-an untuk tekstur komponen, yaitu komponen tekstur tembaga (*copper texture component*), komponen tekstur kuningan (*Brass texture component*), serta komponen tekstur Taylor (*Taylor texture component*). Analisis orientasi pilihan (*preferred orientations*) untuk mendeskripsikan evolusi tekstur suatu material dilakukan pada *pole figure* dengan memperkirakan orientasi tersebut terhadap posisi komponen tekstur yang diharapkan. Tabel 5 menunjukkan komponen-komponen tekstur pada paduan logam (Lohmuller dkk., 2018).



Sumber: Raffi dkk. (2010)

**Gambar 48.** Difraktogram dari Nanopartikel Tembaga (Cu)

**Tabel 5.** Definisi Komponen Tekstur pada Paduan Logam

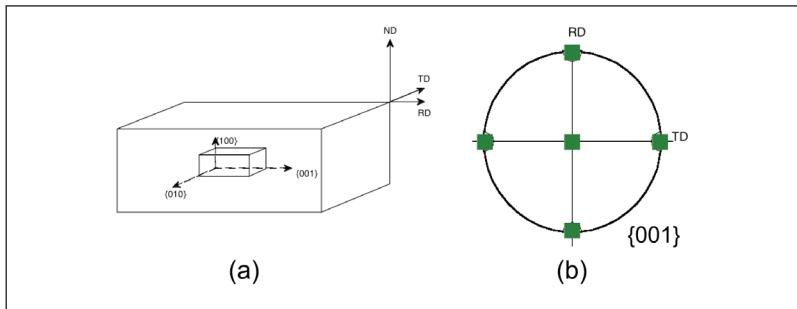
Komponen Tekstur	Simbol	Sudut-sudut Euler* $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$	Indeks Miller
Cb ( <i>Cube</i> )		0, 0, 0	{001}<100>
G ( <i>Goss</i> )		0, 45, 0	{110}<100>
B ( <i>Brass</i> )		35, 45, 0	{110}<112>
G/B ( <i>Goss/Brass</i> )		74, 90, 45	{110}<115>
Cu ( <i>Copper</i> )		90, 35, 45	{112}<111>
A		35, 90, 45	{110}<111>
F		30/90, 55, 45	{111}<112>
P		30, 90, 45	{011}<211>
CuT		90, 74, 45	{552}<115>
S		59, 37, 63	{123}<634>

\*) akan dijelaskan di Bab 4

Sumber: Lohmuller dkk. (2018)

Penting untuk bisa mengetahui posisi-posisi kutub (*poles*) dari komponen-komponen tekstur pada *stereogram* atau *pole figure*. Dengan begitu, analisis tekstur kristalografi suatu material pada *stereogram* atau *pole figure* semakin lengkap, selain informasi tentang simetri kristal (lihat Subbab C pada BAB III).

Gambar 49a memperlihatkan contoh komponen tekstur Cb atau tekstur *Cube* ketika kelompok arah <100> sejajar dengan sumbu RD, TD, dan ND. Gambar 49b menunjukkan posisi tekstur Cb pada *pole figure* {001}. Tekstur Cb berada pada kutub-kutub utama dari *pole figure* ini, yaitu 001, 100, 010, 010, dan 100. Orientasi pilihan komponen Cb ini banyak ditemukan pada tekstur logam-logam berstruktur kubus pusat muka/sisi (FCC).



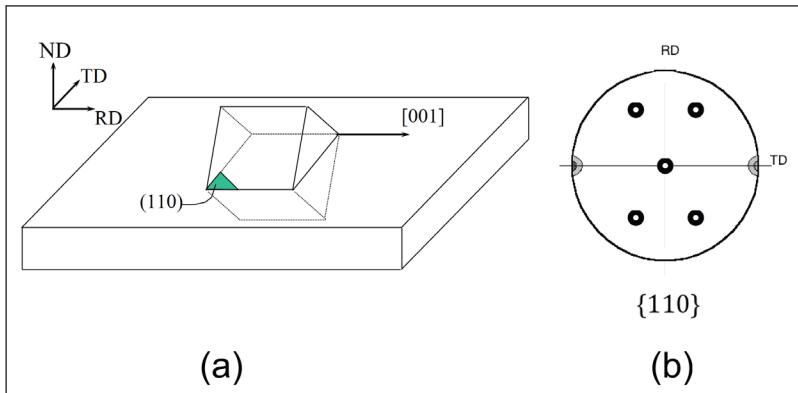
Ket.: (a) Orientasi pada sistem koordinat spesimen, (b) posisi pada *pole figure* {001}.

Sumber: Texture components and euler angles (t.t.)

**Gambar 49.** Komponen Tekstur *Cube* (Cb)

Gambar 50a memperlihatkan komponen tekstur G atau tekstur *Goss*, yaitu bidang (110) berorientasi ke arah ND, sedangkan arah [001] pada bidang (110) sejajar dengan arah RD. Gambar 50b menunjukkan posisi tekstur G pada *pole figure* {110}, ketika salah satu kutub berada pada titik tengah *pole figure* (searah ND), dengan empat lainnya berada pada sudut  $60^\circ$  atau  $90^\circ$ , tetapi miring  $45^\circ$  dari RD. Tekstur *Goss* biasanya terjadi pada material berstruktur FCC, seperti paduan kuningan yang mengalami rekristalisasi.

Tekstur B atau tekstur *Brass* terjadi pada komponen tekstur arah canai/rol (RD) pada material seperti kuningan, perak, dan baja tahan karat. Gambar 51a memperlihatkan orientasi tekstur *Brass* pada sistem koordinat spesimen, ketika arah <112> sejajar dengan arah RD. Gambar 51b menunjukkan posisi tekstur B pada tiga varian *pole figures*, yaitu (100), (110), dan (111). Tekstur B pada *pole figure* (110) serupa dengan tekstur *Goss* (Gambar 50b), hanya terputar berlawanan arah jarum jam.

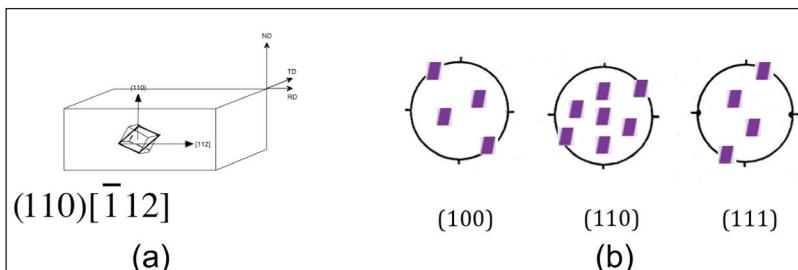


Ket.: (a) Orientasi pada sistem koordinat spesimen, (b) Posisi pada *pole figure* {110}.

Sumber: Texture Components and Euler Angles: Part 1 June 2007 (t.t.)

**Gambar 50.** Komponen Tekstur Goss (G)

Tabel 6 menampilkan contoh keterkaitan antara tekstur kristalografi pada *pole figure* (111) dan keberadaan berbagai komponen tekstur (1 Typical Textures part 1 Thermomechanical Processing TMP). Terlihat bahwa orientasi tekstur yang terbentuk secara signifikan mengandung komponen-komponen tekstur *Copper*, S1, S2, S3, *Brass*, *Taylor*, dan *Goss*.



Ket.: (a) Orientasi pada sistem koordinat spesimen; (b) Posisi pada *pole figures* (100), (110), dan (111).

Sumber: Texture Components and Euler Angles: Part 1 June 2007 (t.t.)

**Gambar 51.** Komponen Tekstur Brass (B)

## F. Inverse Pole Figure

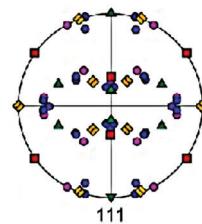
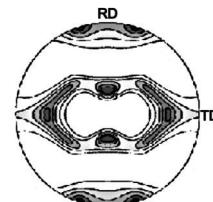
Perbedaan antara *inverse pole figure* dan *pole figure* adalah orientasi kristal pada *inverse pole figure* mengacu pada sumbu kristal. Perlu diingat kembali bahwa orientasi kristal pada *pole figure* diplot dengan referensi sumbu spesimen, yaitu RD, TD, dan ND. Pada Subbab C di Bab III ini, telah dibahas tentang simetri kristal dan plotnya pada *pole figure*, seperti terlihat pada Gambar 44. *Inverse pole figure* menggunakan informasi kutub-kutub bidang utama pada *pole figure* untuk memvisualisasi tekstur yang terbentuk pada material. Namun, yang diperlukan pada *inverse pole figure* cukup satu bidang segitiga stereografik (Gambar 52) karena segitiga-segitiga lainnya ekuivalen simetris. Perhatikan bahwa kutub-kutub (*poles*) dari keseluruhan segitiga stereografik berulang berdasarkan pada kelompok arah  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ , dan  $\langle 111 \rangle$ . Jadi, setiap titik sudut dari segitiga stereografik yang ditentukan pada Gambar 52 bisa saja satu dari 48 arah kristal yang ekuivalen simetris pada sistem kristal kubik.

**Tabel 6.** Contoh tekstur pada *pole figure*  $\langle 111 \rangle$  yang mengandung banyak komponen tekstur.

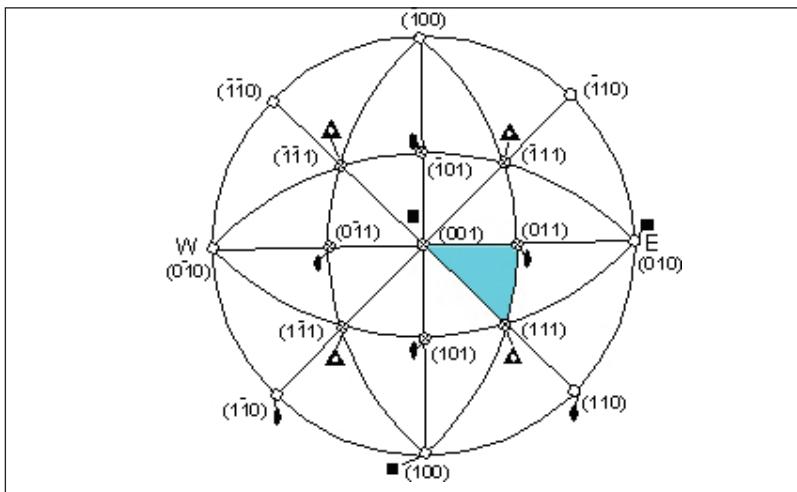
Nama Komponen	Indeks Miller	Sudut-sudut Euler versi Bunge* $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$
Copper	$\{112\} \langle 11\bar{1} \rangle$	$90^\circ, 35^\circ, 45^\circ$
S1	$\{124\} \langle 24\bar{1} \rangle$	$59^\circ, 29^\circ, 63^\circ$
S2	$\{123\} \langle 41\bar{2} \rangle$	$47^\circ, 37^\circ, 63^\circ$
S3	$\{123\} \langle 63\bar{4} \rangle$	$59^\circ, 37^\circ, 63^\circ$
Brass	$\{110\} \langle \bar{1}\bar{1}2 \rangle$	$35^\circ, 45^\circ, 0^\circ$
Taylor	$\{4\ 4\ 11\} \langle 11\ 8\ \rangle$	$7^\circ, 71^\circ, 70^\circ$
Goss	$\{110\} \langle 001 \rangle$	$0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$

\* ) akan dijelaskan di Bab 4

Sumber: 1 Typical Textures (t.t.)

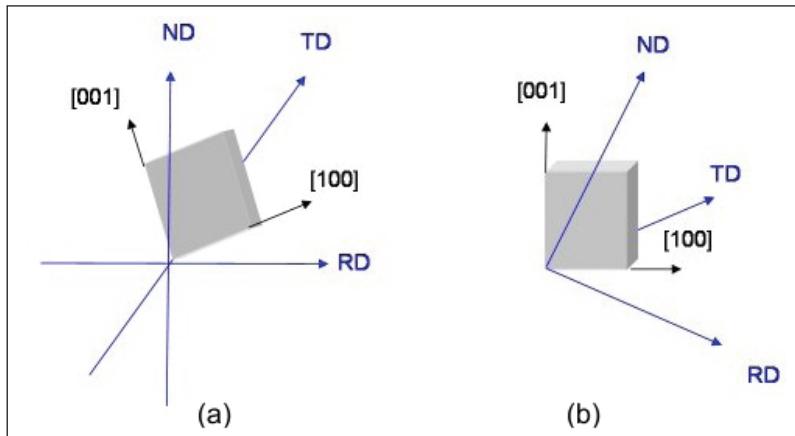


Perhatikan Gambar 53a dan 53b. Pada Gambar 53a, sebuah sel satuan kristal kubik diilustrasikan memiliki orientasi terhadap sumbu-sumbu spesimen, yaitu RD, TD, dan ND. Sebaliknya, Gambar 53b menunjukkan sumbu-sumbu spesimen (RD, TD, dan ND) yang memiliki orientasi terhadap sumbu-sumbu sel satuan kristal. Sekarang, bila sel satuan tersebut dirotasikan sedemikian rupa sehingga arah [001] berimpitan dengan sumbu ND serta RD dan TD juga berimpitan dengan sisi-sisi sel satuan (Gambar 54), lalu berkas sinar-X atau neutron pada *goniometer* ditembakkan ke spesimen searah dengan sumbu ND-[001] tersebut, akan diperoleh *stereogram* seperti terlihat pada Gambar 55.



Sumber: Nelson (2014)

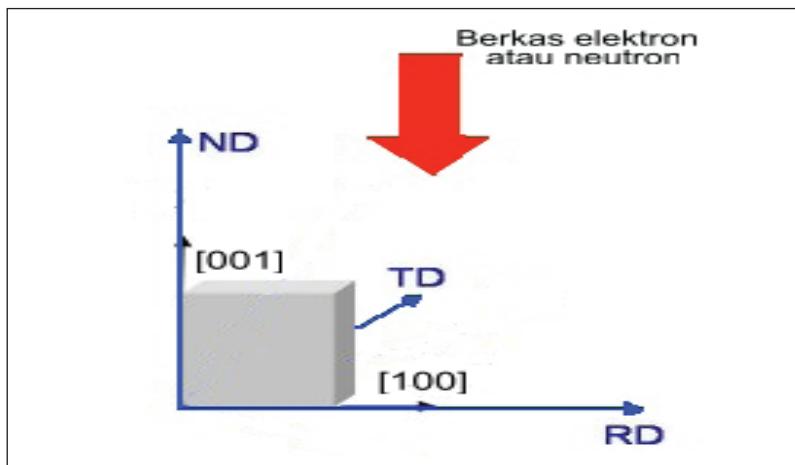
**Gambar 52.** Segitiga Inverse Pole Figure yang Mewakili 48 Simetri Arah Lainnya



Ket.: (a) Sel satuan kristal kubik yang memiliki orientasi terhadap sumbu-sumbu spesimen, dan (b) sumbu-sumbu spesimen yang memiliki orientasi terhadap sumbu-sumbu sel satuan kristal.

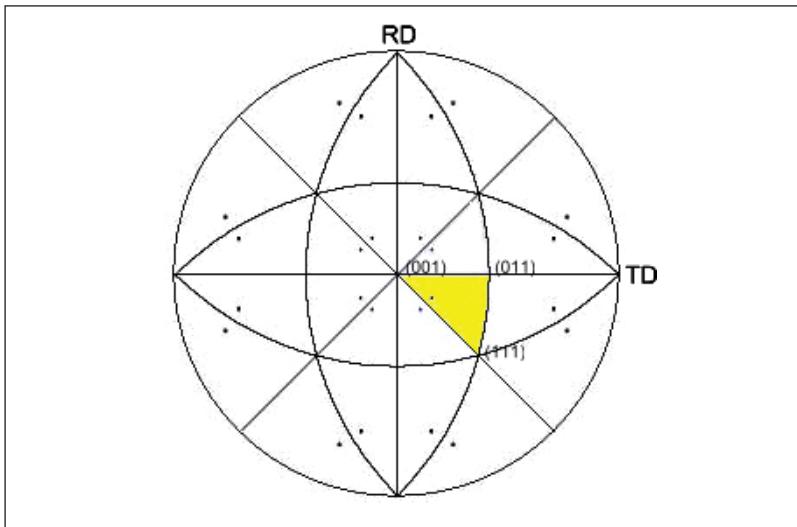
Sumber: Inverse Pole Figure (t.t.)

**Gambar 53.** Ilustrasi Sumbu-Sumbu Spesimen



Sumber: Squires & Hartmann (2015)

**Gambar 54.** Sumbu ND berimpitan dengan arah [001] serta berkas elektron atau neutron datang ke sel satuan sejajar dengan sumbu ND-[001].

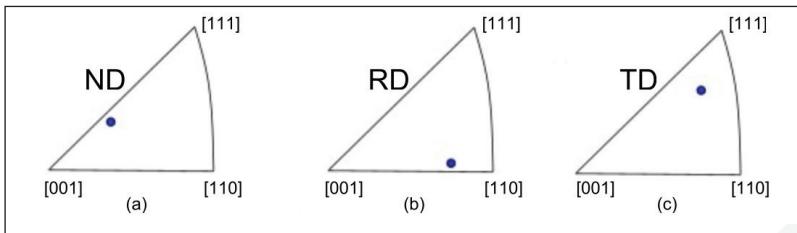


Ket.: Arah-arah atau kutub-kutub (*poles*) pada segitiga warna kuning berulang dalam *stereogram* karena pada sistem kristal kubik terdapat 48 arah simetri yang ekuivalen.

Sumber: Inverse Pole Figure (t.t.)

**Gambar 55. Stereogram dari ND-[001]**

Segitiga warna kuning pada Gambar 55 atau biru muda pada Gambar 52 lalu dikeluarkan dari *stereogram* sebagai perwakilan dari 48 simetri arah pada sistem kristal kubik, seperti terlihat pada Gambar 56a dengan notasi ND. Segitiga perwakilan yang dibalik (dari bawah ke atas) inilah yang disebut sebagai *inverse pole figure*. Jika hal serupa seperti pada Gambar 54 dilakukan untuk RD dan TD, akan diperoleh *inverse pole figures* seperti pada Gambar 56b dan 56c.

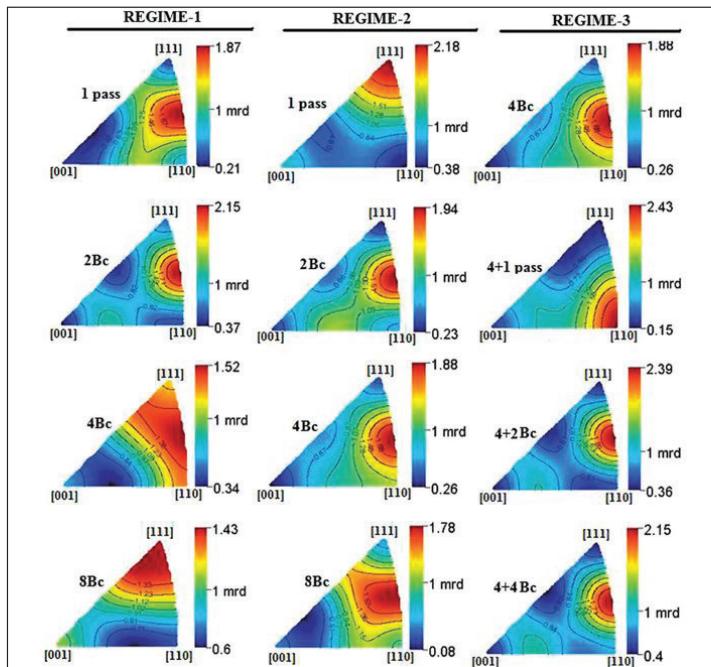


Ket.: (a) ND, (b) RD, dan (c) TD.

Sumber: Squires & Hartmann (2015)

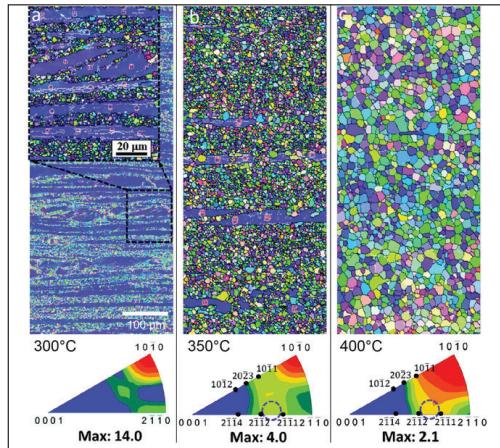
**Gambar 56. Inverse Pole Figures**

*Inverse pole figures* biasanya digunakan untuk analisis mikrotekstur, walau bisa juga untuk makrotekstur (Pramono, 2001; Purcek dkk., 2012). Gambar 57 memberikan contoh penggunaan *inverse pole figures* untuk analisis makrotekstur (Purcek dkk., 2012). Pada analisis mikrotekstur, *inverse pole figures* digunakan sebagai informasi pelengkap (skala legenda) dalam menyampaikan orientasi beserta intensitasnya dari suatu struktur mikro “*of interest*” hasil observasi EBSD, seperti terlihat pada Gambar 58 (Zeng dkk., 2018). Seperti pada *pole figures*, komponen-komponen tekstur juga bisa diidentifikasi pada *inverse pole figures*. Gambar 59 menunjukkan contoh *inverse pole figures* dari komponen-komponen tekstur S, Cube, Dillamore, Goss, Brass, Q, dan X pada paduan Al-2%Mg yang diolah hasil simulasi dengan metode *quasi-Monte-Carlo* (QMC) (Stoica dkk., 2018).



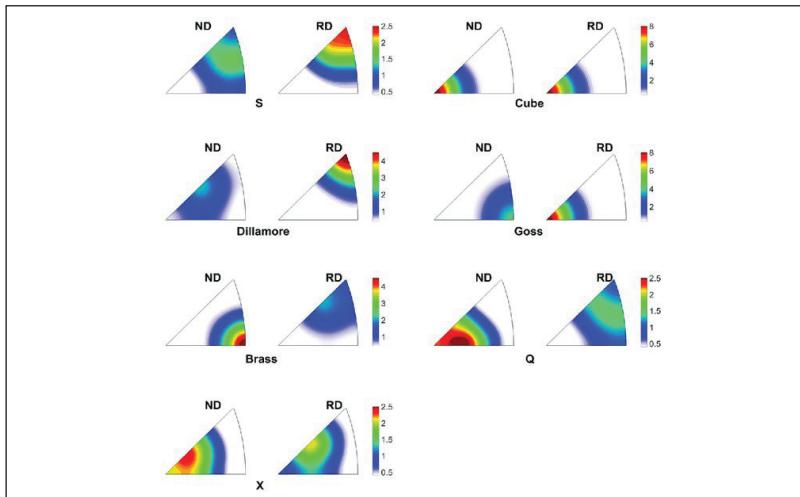
Sumber: Purcek dkk. (2012)

**Gambar 57.** Perbandingan *inverse pole figures* dari bilet tembaga *ultra-fine grained* (UFG) pada tiga kondisi (*regime*) proses yang berbeda.



Sumber: Zeng dkk. (2018)

**Gambar 58.** Pemetaan EBSD beserta *inverse pole figures* terkait dari paduan Mg-0.2Zn-0.3Ca-0.1Mn yang diekstrusi pada (a) 300°C, (b) 350°C, dan (c) 400°C.



Sumber: Stoica dkk. (2018)

**Gambar 59.** Komponen-komponen tekstur *inverse pole figures* pada paduan Al-2%Mg yang dirol hasil simulasi dengan metode *quasi-Monte-Carlo* (MC).



# BAB IV

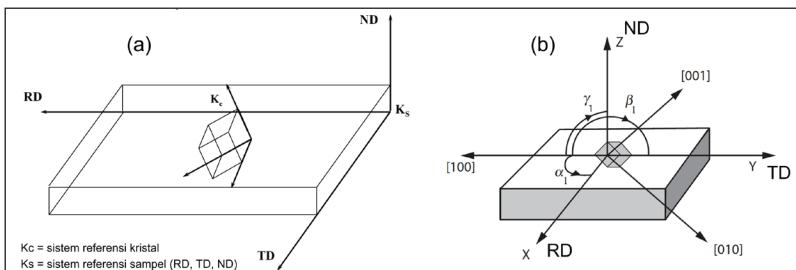
## Fungsi Distribusi Orientasi/FDO *(Orientation Distribution Function/ODF)*

Indeks Miller bidang atau arah pada sistem kristal kubik ataupun HCP terimplementasi pada analisis tekstur kristalografi yang menggunakan *pole figures* (PF) ataupun *inverse pole figures* (IPF), seperti telah di-diskusikan pada Bab III. Indeks bidang atau arah ini muncul dalam bentuk kutub-kutub (*poles*) pada PF ataupun IPF. Eksistensi indeks Miller pada PF dan IPF terjadi karena sistem referensi kristal yang mengandung (h, k, dan l), (u, v, t, dan w), atau (U, V, dan W) merupakan komponen utama dalam memahami perbedaan orientasi antarkristal itu sendiri ataupun orientasi kristal terhadap sistem referensi spesimen (RD, TD, dan ND). Ketika korelasi antara sistem referensi kristal terhadap sistem referensi spesimen dianalisis lebih mendalam, terobservasi suatu distribusi orientasi kristal yang kontinum sebagai fungsi operasi transformasi dari sistem referensi spesimen ke sistem referensi kristal atau sebaliknya. Tabel 5 dan Tabel 6 pada Bab 3 menyebut komponen fungsi transformasi ini sebagai sudut-sudut Euler (*Euler angles*).

## A. Sudut-Sudut Euler dan Ruang Euler (*Euler Angles and Euler Space*)

### 1. Matriks Orientasi dan Sudut-Sudut Euler

Perhatikan Gambar 60a, di mana terdapat sistem referensi kristal (Kc) dan sistem referensi spesimen (Ks). Terdapat tiga derajat kebebasan atau *three degrees of freedom* yang berkorelasi dengan tiga sumbu pada masing-masing Kc dan Ks, untuk melakukan operasi transformasi dari Ks ke Kc. Gambar 60b memperlihatkan korelasi antara Ks dan Kc melalui keberadaan sistem koordinat spesimen, yaitu XYZ (RD, TD, dan ND) serta sistem koordinat kristal 100, 010, dan 001. Sementara itu,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ , dan  $\gamma_1$  merupakan sudut-sudut yang terbentuk antara arah [100] dan RD, TD, serta ND, di mana nilai *cosinus* dari sudut-sudut tersebut menjadi baris pertama dari matriks orientasi (g). Tanpa perlu digambar, maka  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ , dan  $\gamma_2$  merupakan sudut-sudut yang terbentuk antara arah [010] dengan RD, TD, dan ND, serta nilai *cosinus* dari sudut-sudut tersebut menjadi baris kedua dari matriks orientasi (g).  $\alpha_3$ ,  $\beta_3$ , dan  $\gamma_3$  merupakan sudut-sudut yang terbentuk antara arah [001] dan RD, TD, serta ND dengan nilai *cosinus* dari sudut-sudut tersebut menjadi baris ketiga dari matriks orientasi (g). Matriks orientasi (g) sendiri tertera pada Persamaan 4.1. Matriks orientasi (g) memungkinkan arah kristal diekspresikan dari arah spesimen yang sejajar serta sebaliknya, sesuai Persamaan 4.2.



Ket.: (a) Sistem referensi Kc dan Ks serta (b) korelasi antara Ks dan Kc melalui keberadaan sistem koordinat spesimen XYZ (RD, TD, dan ND) dengan sistem koordinat kristal 100, 010, dan 001.

Sumber: Engler & Randle (2009); Kestens (t.t.)

**Gambar 60.** Sistem Referensi dan Korelasi antara Kc dan Ks

$$g = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.1}$$

$$Kc = g \cdot Ks \quad \text{Persamaan 4.2}$$

Akan tetapi, sebelum transformasi pada Persamaan 4.2 dilakukan,  $Kc$  harus memenuhi dulu kriteria ortonormal, yaitu sumbu-sumbu kristal harus tegak lurus satu sama lain serta panjang kisi-kisi atau rusuk-rusuk harus sama. Sistem kristal kubik (FCC dan BCC) secara otomatis telah memenuhi kriteria ortonormal, tetapi tidak untuk sistem kristal HCP. Gambar 61a dan 61b menunjukkan bagaimana arah dan sumbu di HCP agar memenuhi kriteria ortonormal, dengan dua pilihan yang jelas, yaitu

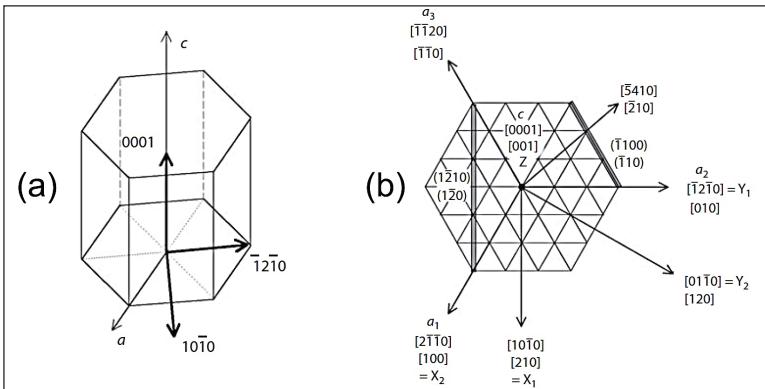
- $X_1 = [10\bar{1}0]$ ,  $Y_1 = [\bar{1}2\bar{1}0]$ ,  $Z = [0001]$ , seperti terlihat pada Gambar 61a; serta
- $X_2 = [2\bar{1}\bar{1}0]$ ,  $Y_2 = [01\bar{1}0]$ ,  $Z = [0001]$ , seperti terlihat pada Gambar 61b.

Untuk mentransformasi sistem kristal kubik dan HCP ke sistem kristal yang ortonormal, diperlukan suatu matriks transformasi ( $L$ ), seperti tertera pada Persamaan 4.3. Rincian analitis matriks  $L$  pada sistem kristal ortorombik, termasuk sistem kristal kubik, tertera pada Persamaan 4.4. Sementara itu, rincian analitis matriks  $L$  untuk sistem kristal HCP tertera pada Persamaan 4.5.

$$Kc_{\text{ortonormal}} = L \cdot Kc \quad \text{Persamaan 4.3}$$

$$L_{\text{ortorombik}} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.4}$$

$$L_{\text{HCP}} = \begin{bmatrix} a & -a/2 & 0 \\ 0 & a\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.5}$$



Ket.: (a)  $X_1 = [10\bar{1}0]$ ,  $Y_1 = [\bar{1}2\bar{1}0]$ ,  $Z = [0001]$ , dan (b)  $X_2 = [2\bar{1}\bar{1}0]$ ,  $Y_2 = [01\bar{1}0]$ ,  $Z = [0001]$ .  
 Sumber: Engler & Randle (2009)

**Gambar 61.** Sumbu-Sumbu Ortonormal pada Struktur HCP

Kembali pada Persamaan 4.2,  $K_c$  kini telah memenuhi kriteria ortonormal. Ketika  $K_s$  ditransformasi menjadi  $K_c$ , perlu dilakukan tiga rotasi sedemikian rupa, dan jika dilakukan dengan benar,  $K_s$  tepat menjadi  $K_c$ . Dengan kata lain, rotasi ini mengacu pada matriks orientasi ( $g$ ), di mana tiga sudut rotasi tersebut dinamakan sudut-sudut Euler (*Euler angles*).

Gambar 62 memperlihatkan bagaimana sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) terbentuk ketika:

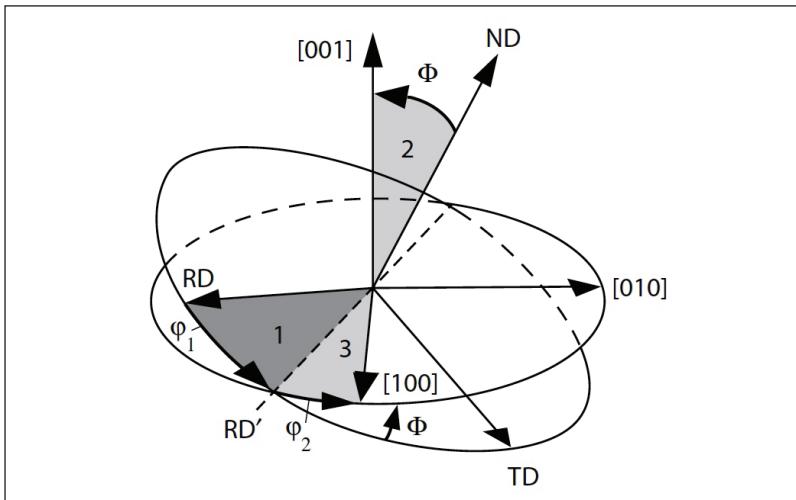
Langkah 1: RD diputar sebesar  $\varphi_1$  terhadap ND menjadi ke RD';

Langkah 2: ND diputar sebesar  $\Phi$  terhadap RD' menjadi ke [001]; serta

Langkah 3: RD' diputar sebesar  $\varphi_2$  terhadap [001] menjadi ke [100].

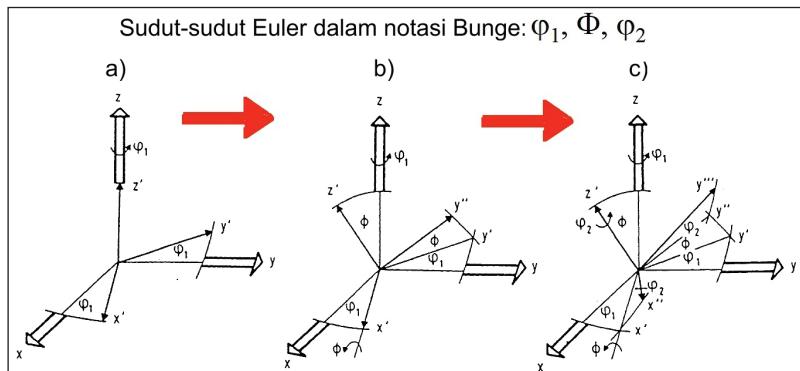
Gambar 63 memperlihatkan hal serupa, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 62, yaitu sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) terbentuk ketika:

- 1) Sumbu x diputar sebesar  $\varphi_1$  terhadap sumbu z menjadi ke sumbu x'. Sumbu y juga terputar menjadi ke sumbu y';
- 2) Sumbu z diputar sebesar  $\Phi$  terhadap sumbu x' menjadi ke sumbu z'. Sumbu y' juga terputar menjadi ke sumbu y"; serta
- 3) Sumbu x' diputar sebesar  $\varphi_2$  terhadap sumbu z' menjadi ke sumbu x''. Sumbu y'' juga terputar menjadi ke sumbu y'''.



Sumber: Engler & Randle (2009)

**Gambar 62.** Pembentukan sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) untuk rotasi sistem RD-TD-ND ke sistem [100]-[010]-[001].



Sumber: Bunge (1965)

**Gambar 63.** Pembentukan sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) untuk rotasi sistem x-y-z ke sistem x'''-y'''-z'.

Rincian analitis matriks rotasi ( $g$ ) untuk ketiga sudut Euler dapat dilihat pada Persamaan 4.6, 4.7, serta 4.8. Perkalian  $g_{\varphi_2}$ ,  $g_{\Phi}$ , serta  $g_{\varphi_1}$  menghasilkan matriks rotasi ( $g$ ) seperti terlihat pada Persamaan 4.9. Jika perkalian pada Persamaan 4.9 tersebut diuraikan untuk setiap

$$g_{\varphi 1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.6}$$

$$g_{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.7}$$

$$g_{\varphi 2} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Persamaan 4.8}$$

$$g = g_{\varphi 2} \cdot g_{\Phi} \cdot g_{\varphi 1} \quad \text{Persamaan 4.9}$$

$$g_{11} = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi$$

$$g_{12} = \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi$$

$$g_{13} = \sin \varphi_2 \sin \Phi$$

$$g_{21} = -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Phi$$

$$g_{22} = -\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Phi$$

$$g_{23} = \cos \varphi_2 \sin \Phi$$

$$g_{31} = \sin \varphi_1 \sin \Phi$$

$$g_{32} = -\cos \varphi_1 \sin \Phi$$

$$g_{33} = \cos \Phi$$

Persamaan 4.10

elemen dalam matriks rotasi ( $g$ ), hasilnya dapat dilihat pada Persamaan 4.10.

Perlu diingat kembali bahwa matriks orientasi ( $g$ ) bisa diekspresikan sebagai fungsi dari sudut-sudut  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  (Persamaan 4.1), ataupun sebagai fungsi dari sudut-sudut Euler  $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ . (Persamaan 4.10). Persamaan 4.1 juga bisa dikaitkan dengan Persamaan 4.10 untuk memperoleh korelasi antara sudut-sudut  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  dengan sudut-sudut Euler  $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ .

Selain notasi sudut-sudut Euler konvensional ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ) yang dicetuskan oleh Bunge pada 1965 (Bunge, 1965), terdapat dua jenis notasi lain untuk sudut-sudut Euler, yaitu notasi Roe ( $\Psi$ ,  $\Theta$ ,  $\Phi$ ) (Roe, 1965) serta notasi Kocks ( $\Psi$ ,  $\Theta$ ,  $\phi$ ) (Kocks, 1988). Walaupun  $\Psi$  dan  $\Theta$  identik, baik untuk notasi Roe maupun Kocks,  $\phi = \pi - \Phi_{\text{Roe}}$ . Korelasi antara sudut-sudut-sudut Euler oleh Bunge dan Roe dapat dilihat pada

Bunge – Roe:

$$\varphi_1 = \Psi + \frac{\pi}{2} \quad \Phi = \Theta \quad \varphi_2 = \Phi - \frac{\pi}{2} \quad \text{Persamaan 4.11}$$

Bunge – Kocks:

$$\varphi_1 = \Psi + \frac{\pi}{2} \quad \Phi = \Theta \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \phi \quad \text{Persamaan 4.12}$$

Persamaan 4.11, sedangkan antara Bunge dan Kocks dapat dilihat pada Persamaan 4.12.

## 2. Ruang Euler

Segala bentuk orientasi yang dinyatakan dengan sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ) dapat direpresentasikan sebagai suatu titik di dalam sistem koordinat tiga dimensi yang sumbu-sumbunya adalah sudut-sudut Euler itu sendiri. Gambar 64 menunjukkan variasi ruang Euler yang kerap dipergunakan untuk merepresentasikan makrotekstur. Variasi ini terjadi akibat sering tertukarnya posisi sumbu  $\varphi_1$  dan sumbu  $\varphi_2$ . Gambar 64a memperlihatkan ruang Euler dengan sistem koordinat berkaidah tangan kanan, yaitu jika keempat jari tangan kanan kita (selain ibu jari) diarahkan dari  $\varphi_1$  ke  $\varphi_2$ , ibu jari kita akan mengarah ke bawah se-

arah  $\Phi$ . Dengan analogi yang sama, dapat dipahami bahwa ruang Euler pada Gambar 64b berkaidah tangan kiri.

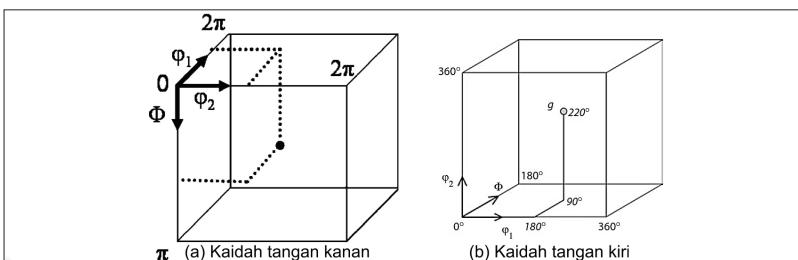
Jangkauan maksimum sudut-sudut  $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$  terlihat jelas dari ruang Euler pada Gambar 64, di mana:

$$0 \leq \varphi_1 \leq 360^\circ \quad \text{Persamaan 4.13}$$

$$0 \leq \Phi \leq 180^\circ \quad \text{Persamaan 4.14}$$

$$0 \leq \varphi_2 \leq 360^\circ \quad \text{Persamaan 4.15}$$

Akan tetapi, variasi simetri kristal dapat memengaruhi jangkauan sudut  $\varphi_1$ . Untuk struktur kristal yang tidak memiliki simetri, seperti triklinik, diperlukan jangkauan  $0 \leq \varphi_1 \leq 360^\circ$  untuk merepresentasikan semua orientasi yang mungkin. Pada simetri ortonormal, contohnya, pada spesimen hasil rol/canai yang memiliki dua bidang simetri di RD dan TD, jangkauan  $\varphi_1$  berkurang seperempatnya menjadi  $0 \leq \varphi_1 \leq 90^\circ$ . Kondisi ini biasa terjadi pada bagian tengah spesimen hasil rol/canai di mana terjadi kondisi *plane strain* (Gambar 65). Ketika hanya ada satu bidang simetri, seperti pada simetri monoklinik, jangkauan  $\varphi_1$  menjadi  $0 \leq \varphi_1 \leq 180^\circ$ . Kondisi ini biasa terjadi pada spesimen yang mengalami *shear*, seperti pada mekanisme torsi atau puntir atau di lapisan permu-kaan spesimen rol/canai, ketika deformasi hanya terjadi pada arah RD (Gambar 66). Tabel 7 merangkum variasi jangkauan sudut-sudut Euler sebagai fungsi dari simetri kristal, serta Gambar 67 memperlihatkan elemen-elemen simetri dari struktur kristal kubik dan sampel ortonormal pada ruang Euler.



Sumber: Engler & Randle (2009)

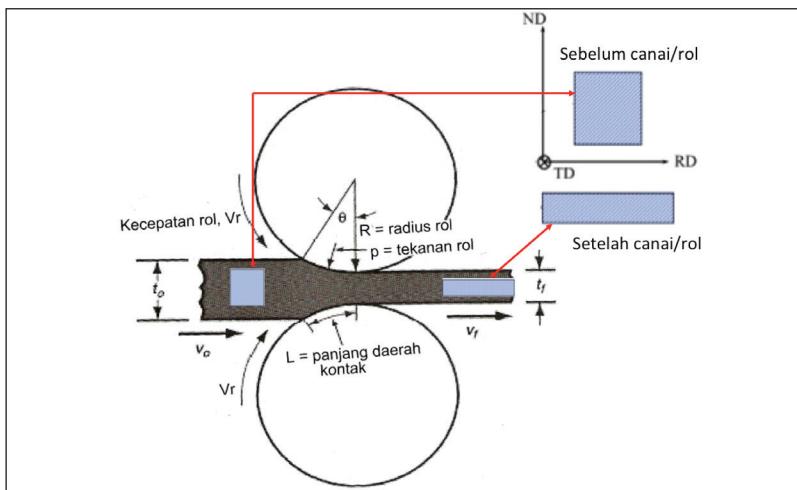
**Gambar 64.** Variasi ruang Euler berbasis (a) kaidah tangan kanan, dan (b) kaidah tangan kiri.

## B. Fungsi Distribusi Orientasi/FDO (*Orientation Distribution Function/ODF*)

Distribusi orientasi (DO) merupakan konsep utama dari analisis tekstur kristalografi dan anisotropi dari material padat. Secara matematis, DO dapat diekspresikan sebagai suatu fungsi ( $f$ ) dari distribusi normalisasi (*normalized distribution*) yang disebut sebagai fungsi distribusi orientasi/FDO (*orientation distribution function/ODF*). Dalam hal ini, FDO dikaitkan dengan tiga variabel, yaitu sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ), sehingga dinotasikan sebagai:

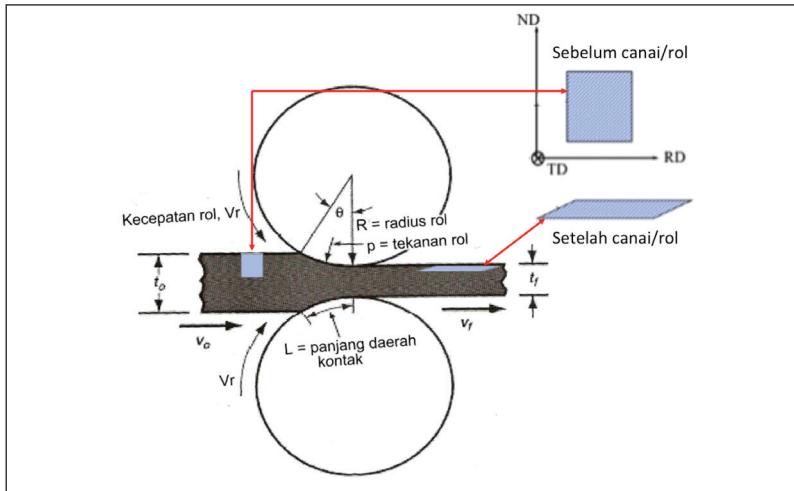
$$f(\text{DO}) = f(\varphi_1, \Phi, \text{ dan } \varphi_2) \quad \text{Persamaan 4.16}$$

FDO erat kaitannya dengan frekuensi kejadian suatu komponen tekstur sehingga penting bahwa nilai  $\text{FDO} \geq 0$ . Bila FDO diberi nilai, artinya suatu kejadian pada sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ) tertentu, akan dihasilkan kepadatan probabilitas (*probability density*).



Sumber: Faris (2015)

**Gambar 65.** Kondisi *plane strain* pada bagian tengah benda rol/canai beserta simetrinya.



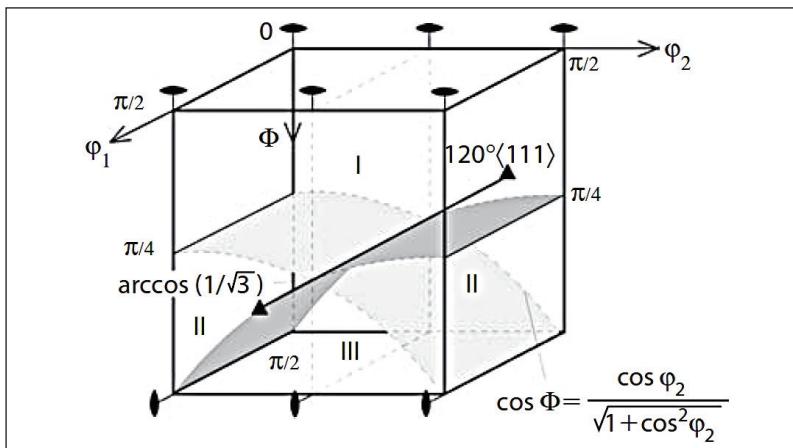
Sumber: Faris (2015)

**Gambar 66.** Kondisi *shear* pada permukaan benda rol/canai beserta simetrinya.

**Tabel 7.** Rangkuman jangkauan sudut-sudut Euler beserta simetri kristal dan simetri spesimen.

Sistem Kristal	Notasi Laue	Simetri Spesimen				
		Simetri Kristal	Ortonormal	Mono-klinik	Tidak Ada (Triklinik)	
		$\Phi$	$\varphi_2$	$\varphi_1$	$\varphi_1$	$\varphi_1$
Triklinik	$\bar{1}$	180°	360°			
Monoklinik	$2/m$	180°	180°			
Ortorombik	mmm	90°	180°			
Trigonal	$\bar{3}$	180°	120°			
	$\bar{3}m$	90°	120°	90°	180°	360°
Tetragonal	$4/m$	180°	90°			
	$4/mmm$	90°	90°			
Heksagonal	$6/m$	180°	60°			
	$6/mmm$	90°	60°			
Kubik	$m\bar{3}$	90°	180°			
	$m\bar{3}m$	90°	90°			

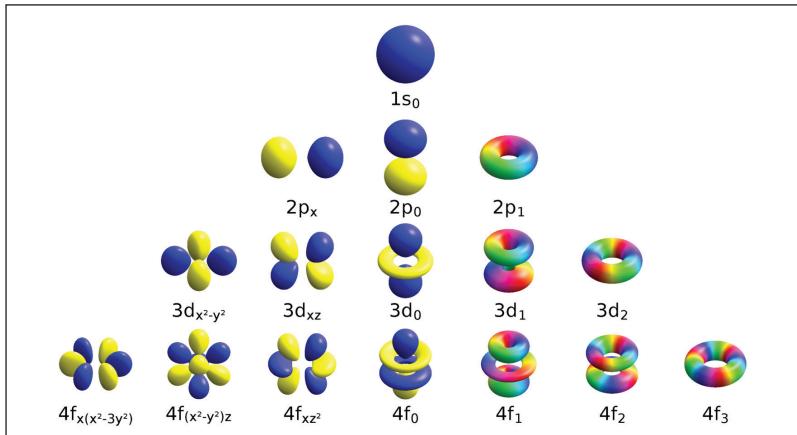
Sumber: Engler & Randle dkk. (2009)



Sumber: Engler & Randle dkk. (2009)

**Gambar 67.** Elemen-elemen simetri dalam ruang Euler untuk simetri kristal kubik dan simetri spesimen ortonormal.

Untuk mengilustrasikan DO secara tiga dimensi sebagai fungsi dari sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ), digunakan ruang Euler (lihat Subbab 2 di Bab IV ini serta Gambar 64). Ruang Euler digunakan karena representasi ekspansi deret dari FDO bergantung pada konsep *generalized spherical harmonics* yang dikembangkan dengan menggunakan sudut-sudut Euler oleh M.H. Protter pada 1948 (Protter, 1948). Fungsi *generalized spherical harmonics* juga digunakan untuk mendeskripsikan orbit elektron pada fisika kuantum (Gambar 68). Dalam perkembangannya, *generalized spherical harmonics* dikonversi menjadi *hyperspherical harmonic expansions* untuk menganalisis DO (Mason & Schuh, 2009). Perlu dipahami bahwa ruang tiga dimensi untuk mendeskripsikan DO bersifat periodik, kecuali bila menggunakan konvensi ruang vektor Rodrigues (Rodrigues, 1840). Setiap titik pada DO merepresentasikan orientasi spesifik tunggal atau komponen tekstur. Karena kebanyakan sifat material bergantung pada orientasi yang kompleks dan tercakup oleh sudut-sudut Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ), DO perlu digunakan untuk memprediksi sifat-sifat tersebut. Informasi dari *pole figures* (PF) ataupun *inverse pole figures* (IPF) tidak cukup untuk melakukan prediksi tersebut. Selain itu, DO perlu didukung oleh data struktur mikro untuk memprediksi anistropi dari sifat material.



Ket.: Variasi warna menunjukkan fasa dari fungsi gelombang (*wave function*).

Sumber: File: Atomic orbitals spdf m-eigenstates and superpositions.png (t.t.)

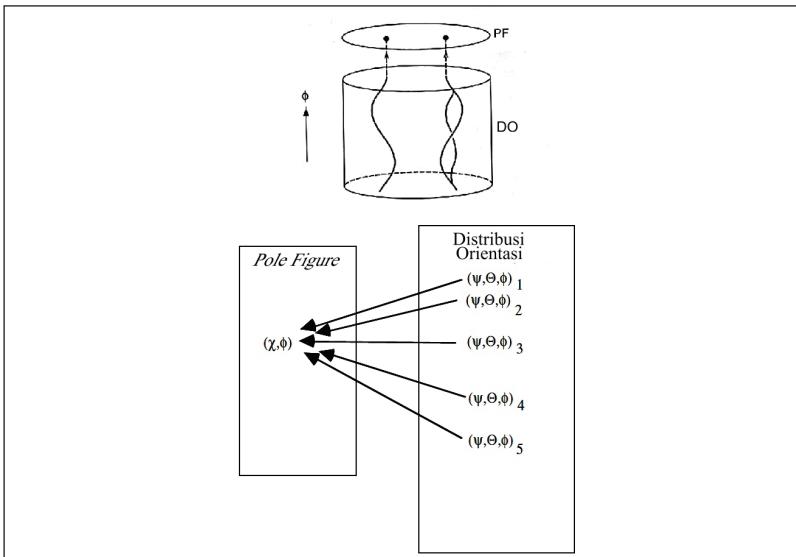
**Gambar 68.** Sebanyak 16 orbit elektron tunggal dibentuk berbasis fungsi *generalized spherical harmonic* untuk empat bilangan kuantum ( $n$ ) terkecil.

Bila tekstur kristalografi bersifat acak, DO perlu didefinisikan dan dinormalisasi sehingga memiliki nilai kesatuan (*unity*), yaitu 1. Ini berarti FDO pada Persamaan 4.16 perlu dielaborasi dan diintegrasikan pada ruang Euler untuk menghasilkan nilai 1 (*unity*), seperti tertera pada Persamaan 4.17.

Bagaimana keterkaitan antara PF dan DO? PF tidak lain adalah proyeksi informasi dari DO. Dengan kata lain, banyak titik pada DO di ruang Euler terpetakan ke satu titik saja pada PF. Sebuah garis pada FDO di ruang Euler dapat diintegralkan menjadi sebuah titik pada PF, seperti tertera pada Gambar 69.

$$\oint \mathbf{f}(\mathbf{g}) d\mathbf{g} = 1 \quad \text{Persamaan 4.17}$$

$$\frac{1}{8\pi^2} \iiint f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) \sin \Phi d\varphi_1 d\Phi d\varphi_2 = 1$$



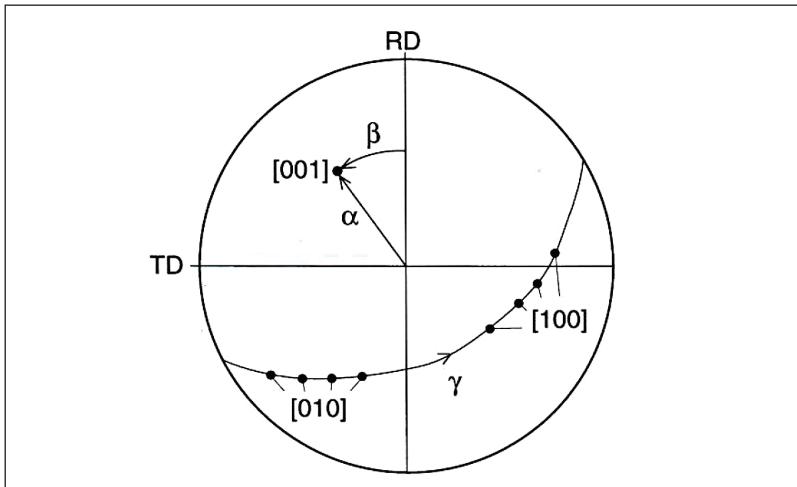
Sumber: L6: The Orientation Distribution, Definition, Discrete Forms, Examples - ppt video online download (t.t.)

**Gambar 69.** Keterkaitan Data di *Pole Figure* (PF) dengan Distribusi Orientasi (DO)

Perhatikan Gambar 70 dari sebuah PF (100). Bila sebuah kutub (*pole*) [001] pada PF tersebut direpresentasikan oleh sudut  $\alpha$  dan  $\beta$ , fungsi  $P_h(\alpha, \beta)$  pada PF sama dengan seluruh area dari FDO pada ruang Euler yang mencakup seluruh rotasi sebesar  $\gamma$  terhadap arah [001] di PF tersebut. Hal ini dapat diekspresikan pada Persamaan 4.18 dengan menyetarakan fungsi  $P_h(\alpha, \beta)$  pada PF dengan FDO dalam bentuk  $f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$  pada ruang Euler.

Gambar 71 memperlihatkan ilustrasi struktur mikro material polikristal yang ditembak oleh berkas elektron atau neutron pada *goniometer* (deretan titik-titik pada garis horizontal) untuk analisis tekstur. Jika material tersebut memiliki volume  $V$  dengan volume kristalit  $i$  adalah  $V_i$  dengan orientasi  $g_i$  serta elemen sudut  $dg$ , fraksi volume  $dV/V$  dari orientasi kristal setara dengan fungsi orientasi pada suatu wilayah *infinitesimal*  $dg$ , seperti tertera pada Persamaan 4.19 dengan pemetaan tiga dimensinya pada ruang Euler terlihat pada Gambar 72a. Bila titik-titik dengan intensitas atau kepadatan probabilitas yang sama

(*iso-intensity*) pada pemetaan tiga dimensi ini dihubungkan oleh garis, diperoleh distribusi orientasi pada ruang Euler seperti terlihat pada Gambar 72b.



Sumber: Orientation Distribution Function (ODF) - ppt video online download (t.t.)

**Gambar 70.** Kutub [001] pada PF dengan komponen  $\alpha$  dan  $\beta$  yang setara dengan rotasi sebesar  $\gamma$  pada FDO di ruang Euler terhadap arah [001] di PF tersebut.

$$P_h(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) d\gamma \quad \text{Persamaan 4.18}$$

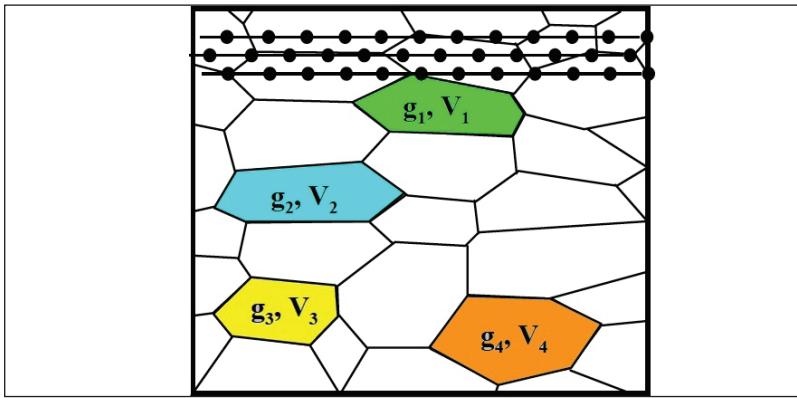
Persamaan 4.19 beserta keterkaitannya dengan pemetaan tiga dimensi pada ruang Euler dihitung dari fungsi transformasi Fourier yang diskrit (*discrete Fourier transform*, DFT) serta diolah dengan bantuan komputasi dan *modeling* komputer, seperti simulasi Monte Carlo (Marquez, 2006), (Karlon dkk., 1999; Odegard dkk., 2003; Klosek, 2017). Transformasi Fourier adalah operasi matematika yang dapat menguraikan persamaan gelombang (*waveform*) menjadi komponen-komponen sinusoidal. Istilah transformasi Fourier mengacu pada representasi domain frekuensi dan operasi matematika yang mengaitkan representasi domain frekuensi ke fungsi ruang atau waktu. Persamaan 4.20 memperlihatkan persamaan fundamental dari transformasi Fourier yang masih berbentuk deret (*series*). Di bidang teknik, fisika, serta

banyak bidang terapan, menggunakan bilangan kompleks membuat se-gala sesuatu lebih mudah dipahami serta lebih elegan secara matematis. Oleh karena itu, fungsi  $g(t)$  pada Persamaan 4.20 perlu diubah menjadi persamaan yang mengakomodasi penjumlahan *infinitesimal* dari fungsi sinusoidal, seperti tertera pada Persamaan 4.21.

$$\frac{dV}{V} = f(g)dg = \frac{1}{8\pi^2} f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) d\varphi_1 d\Phi d\varphi_2 \quad \text{Persamaan 4.19}$$

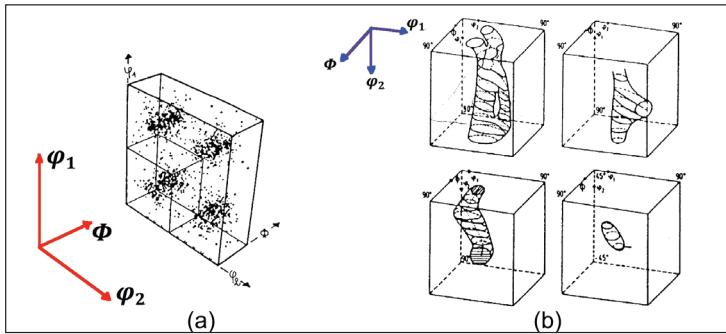
$$\begin{aligned} g(t) &= a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \end{aligned} \quad \text{Persamaan 4.20}$$

Di mana:  $a_m$ ,  $b_n$  = koefisien-koefisien dari deret Fourier



Sumber: Kestens (t.t.)

**Gambar 71.** Material polikristal dengan keberadaan volume per butir ( $V_i$ ) serta orientasi per butir ( $g_i$ ).



Ket.: (a) Pemetaan tiga dimensi dari volume orientasi kristal pada ruang Euler, serta (b) pemetaan volume orientasi kristal pada ruang Euler yang dihubungkan dengan garis-garis *iso-intensity*.

Sumber: Kestens (t.t.)

**Gambar 72.** Pemetaan pada Ruang Euler

Ketika Persamaan 4.21 diintegralkan untuk mencakup jangkauan yang *infinitesimal*, terbentuklah persamaan transformasi Fourier, seperti tertera pada Persamaan 4.22. Persamaan 4.23 memberikan contoh fundamental dari transformasi Fourier (Persamaan 4.22) yang dikembangkan untuk menghasilkan *computer generated images* (cgi) dua dimensi dari suatu distribusi orientasi (Marquez, 2006).

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i \frac{2\pi n t}{T}}$$

Di mana  $e^{it} = \cos t + i \sin t$  **Persamaan 4.21**  
 $i = \sqrt{-1}$

$$\{g(t)\} = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \text{Persamaan 4.22}$$

$$X(u,v) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x(m,n) \exp \left\{ -2\pi j \left( \frac{(u-1)(m-1)}{M} + \frac{(v-1)(n-1)}{N} \right) \right\} \quad \text{Persamaan 4.23}$$

Di mana:

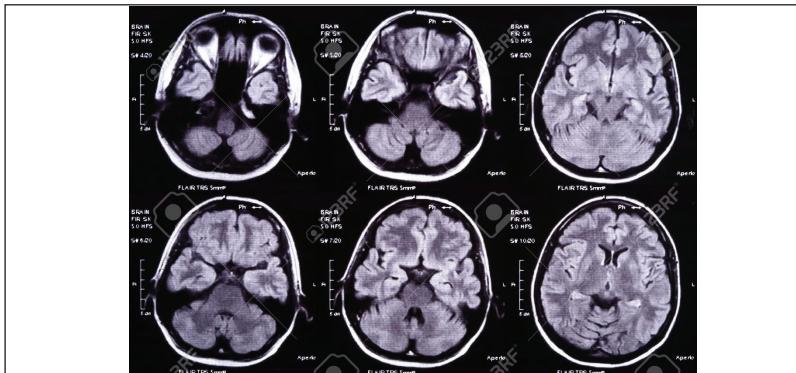
$x(m,n)$  = amplitudo piksel pada  $(m,n)$

$M \times N$  = panjang x lebar gambar

$u, v$  = indeks Miller dua dimensi

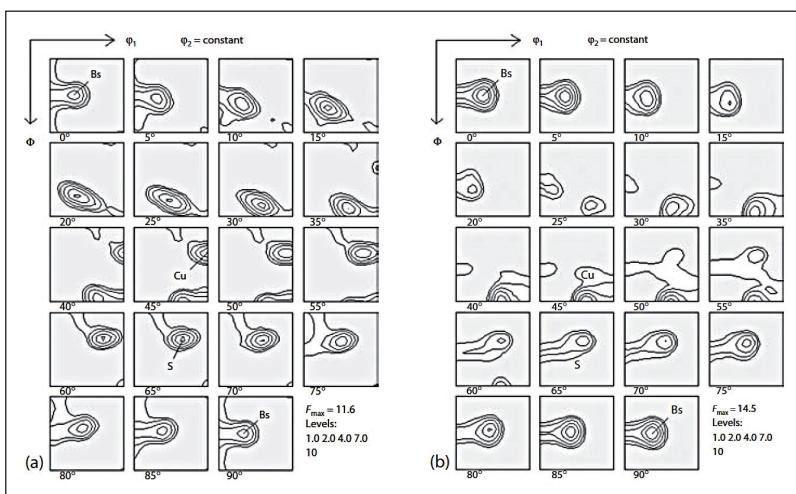
$j = \sqrt{(-1)}$

Untuk menganalisis dan mendiskusikan FDO yang terpetakan secara tiga dimensi pada ruang Euler secara lebih terperinci (lihat Gambar 72b), DO perlu diinvestigasi secara irisan, layaknya analisis hasil *CT scan* di dunia medis (Gambar 73). Untuk investigasi FDO, irisan dilakukan sepanjang sumbu atau dengan tebal irisan =  $5^\circ$  (Gambar 74 dan Gambar 75).



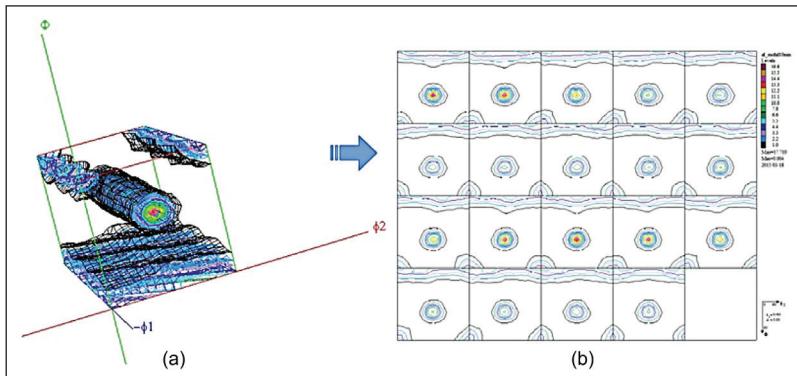
Sumber: Stock photo – Brain x-ray image tomography (t.t.)

**Gambar 73.** Lapisan-Lapisan atau Irisan-Irisan Citra Hasil *CT Scan*



Sumber: Engler & Randle (2009)

**Gambar 74.** FDO tekstur canai/rol dari (a) tembaga (Cu) murni dan (b) kuningan (Cu-37%Zn).



Ket.: (a) representasi tiga dimensi pada ruang Euler; dan (b) lapisan atau irisan dua dimensi pada yang konstan.

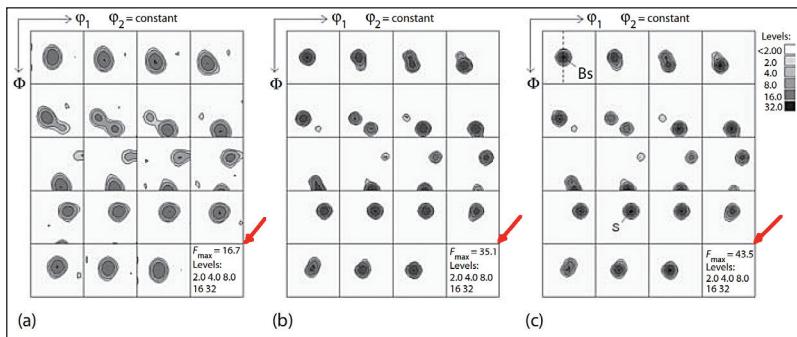
Sumber: Klosek (2017)

**Gambar 75.** Contoh FDO dari Paduan Aluminium (Al) yang Ditarik-Kawat (*wire-drawn*)

Terlepas penggunaannya yang populer, FDO tiga dimensi memiliki beberapa kekurangan. Kekurangan-kekurangan tersebut meliputi

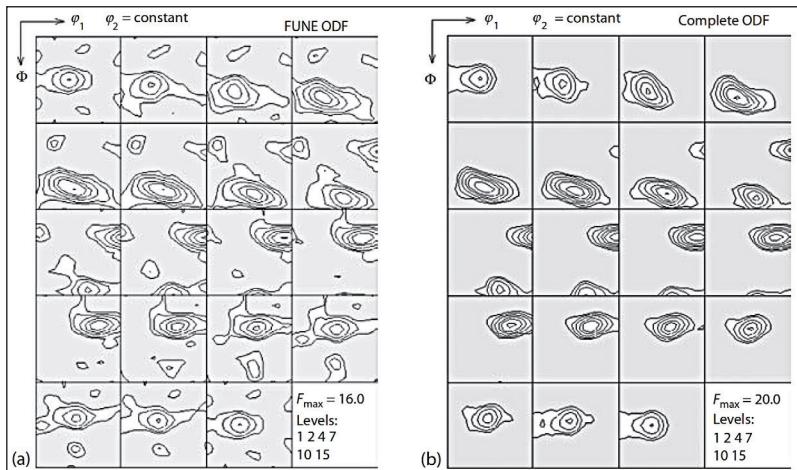
- 1) Kesalahan pemotongan (*truncation error*) terhadap ekspansi deret berbasis fungsi *generalized spherical harmonics* pada PF dan DO. Kesalahan ini menyebabkan terjadinya pelebaran puncak-puncak (*peaks broadening*) dari tekstur utama dan tekstur minor di sekitar komponen-komponen tekstur utama. Untuk meminimalisasi dampak kesalahan pemotongan ini, nilai intensitas ( $I$ ) perlu ditingkatkan. Gambar 76 memperlihatkan dampak dari *truncation error* pada FDO serta solusinya dengan meningkatkan intensitas ( $I$ ). Intensitas maksimum ( $I_{\max}$ ) saat *truncation error* dapat diabaikan bergantung pada resolusi orientasi dari *goniometer* (Matthies, 1982).
- 2) *Ghost error*. Kesalahan jenis ini ditemukan pertama kali oleh Luecke dkk. (1981), ketika beberapa intensitas atau kepadatan probabilitas pada FDO ada yang hilang (*negative ghosts*) atau intensitas yang salah bisa muncul (*positive ghosts*). Penyebab *ghost error* adalah kurangnya urutan ganjil dari koefisien ekspansi deret  $C_l^{mn}$ . Untuk mendapatkan tekstur yang terkoreksi dari *ghost error*,

urutan ganjil dari koefisien harus ditentukan berdasarkan pada asumsi tertentu, yaitu FDO tidak boleh negatif atau  $f(g) \geq 0$ . Gambar 77 memperlihatkan dampak *ghost error* pada FDO dari tekstur canai/rol paduan Al-Fe-Si.



Sumber: Engler & Randle (2009)

**Gambar 76.** Dampak dari *truncation error* pada FDO yang berkurang dengan peningkatan intensitas maksimum ( $I_{\max}$ ), dari (a)  $I_{\max} = 16.7$ ; (b)  $I_{\max} = 35.1$ ; dan (c)  $I_{\max} = 43.5$ .



Ket.: (a) hasil dari eksperimen, dan (b) hasil yang telah terkoreksi dari *ghost error*.

Sumber: Dahms & Bunge (1988); Dahms & Bunge (1989)

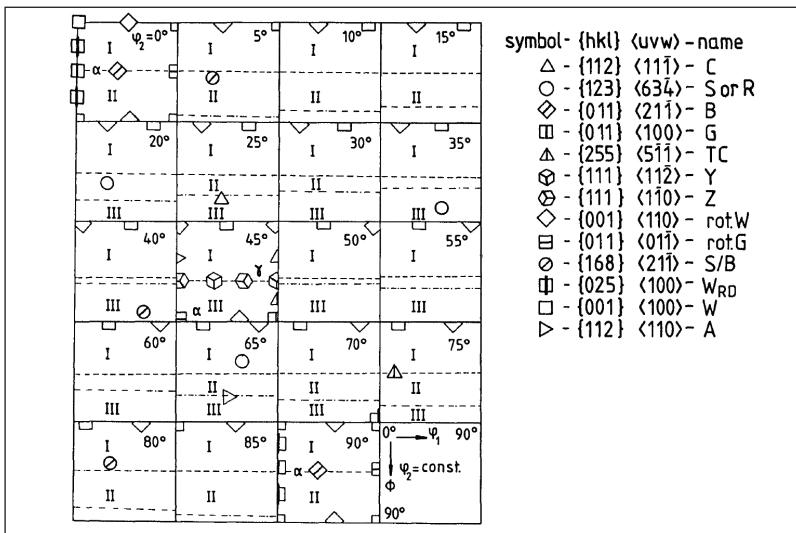
**Gambar 77.** Dampak *Ghost Error* dari Tekstur Canai/Rol Paduan Al-Fe-Si pada FDO

## C. Komponen Tekstur pada Fungsi Distribusi Orientasi

Seperti pada PF dan IPF, FDO juga dapat memberikan informasi tentang keberadaan komponen-komponen tekstur. Pembahasan komponen-komponen tekstur pada PF dapat dilihat pada Subbab E di Bab III (Tabel 5, Tabel 6, Gambar 49, Gambar 50, dan Gambar 51). Sementara itu, pembahasan komponen tekstur pada IPF dapat dilihat pada Subbab F di Bab III (Gambar 59). Selain komponen-komponen tekstur berkarakter spot atau titik yang posisinya ditunjukkan oleh indeks Miller  $\{hkl\}<uvw>$  serta sudut-sudut Miller ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ , dan  $\varphi_2$ ), pada FDO terdapat juga komponen-komponen tekstur berkarakter serat (*fiber*) yang merupakan deretan indeks Miller  $\{hkl\}<uvw>$  pada ruang tiga dimensi Euler. Tekstur serat ini terjadi di sepanjang sumbu  $\varphi_1$  atau  $\Phi$ , dengan jangkauan tekstur serat  $0^\circ \leq \varphi_1 \leq 90^\circ$  atau  $0^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$ . Tekstur serat juga bisa terjadi pada spesifik nilai tertentu dan memanjang sejajar sumbu  $\varphi_1$ , atau sebaliknya. Tekstur serat muncul ketika terjadi simetri rotasi terhadap arah spesimen.  $\{hkl\}<110>$  atau  $\{111\}<uvw>$  adalah komponen tekstur serat pada logam berstruktur BCC yang dirol, berkorelasi dengan simetri rotasi terhadap arah RD atau ND (Klosek, 2017).

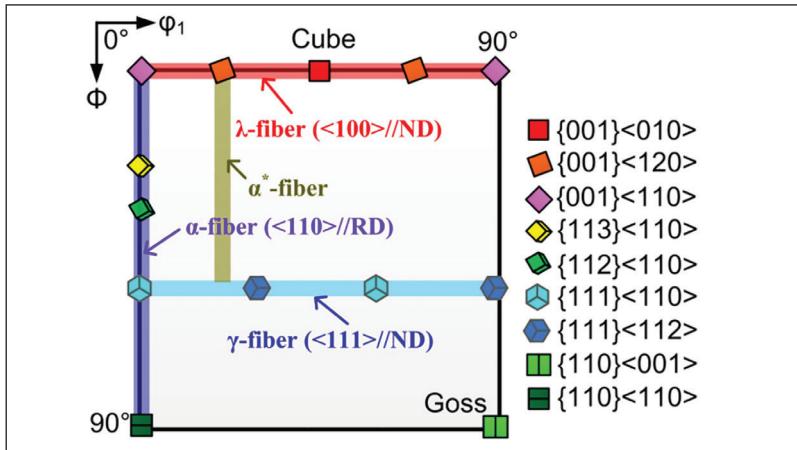
Gambar 78 memperlihatkan FDO dari material berstruktur kubik beserta komponen-komponen teksturnya (Hirsch & Luecke, 1988). Terlihat bahwa munculnya komponen-komponen tekstur terjadi secara optimal pada  $\varphi_2 = 45^\circ$ . Lapisan  $\varphi_2 = 45^\circ$  memang unik untuk probabilitas terjadinya banyak komponen tekstur. Gambar 79 memperlihatkan komponen-komponen tekstur tipikal yang muncul pada  $\varphi_2 = 45^\circ$  untuk material baja listrik (Jiao dkk., 2018). Ketika material baja listrik ini dirol dingin serta dirol panas (dengan persen reduksi 17%, 40%, dan 55%), terjadi evolusi tekstur yang sangat menarik, seperti terlihat pada Gambar 80. Gambar 80a menunjukkan FDO baja listrik yang dirol dingin pada  $\varphi_2 = 45^\circ$ , di mana tekstur terbentuk utamanya pada (1) komponen *Goss*  $\{110\}<001>$ ; (2) komponen serat  $\lambda$  atau tekstur yang terjadi pada  $<100>$  yang sejajar ND, lebih spesifik lagi pada komponen *Cube*  $\{001\}<010>$ ; serta (3) komponen serat  $\gamma$  atau tekstur yang terjadi pada  $<111>$  yang sejajar ND, lebih spesifik lagi pada komponen *Z*  $\{111\}<112>$ . Ketika baja listrik ini dirol

panas (Gambar 80b, 80c, dan 80d), orientasi pada komponen *Goss*  menurun seiring dengan meningkatnya persen reduksi yang diindikasikan oleh berkurangnya intensitas pada komponen *Goss* . Akibat dirol panas, tekstur pada serat  $\lambda$  terurai sedemikian, hingga pada persen reduksi tertinggi 55%, tekstur final terjadi pada semua komponen di sepanjang serat  $\lambda$  yang mencakup  {001}<110>,  {001}<120>, serta *Cube*  {001}<010>, bahkan sampai ke serat  $\alpha$  yang mencakup  {113}<110> dan  {112}<110>. Orientasi pada komponen *Z*  {111}<112> hilang pada persen reduksi 55%.



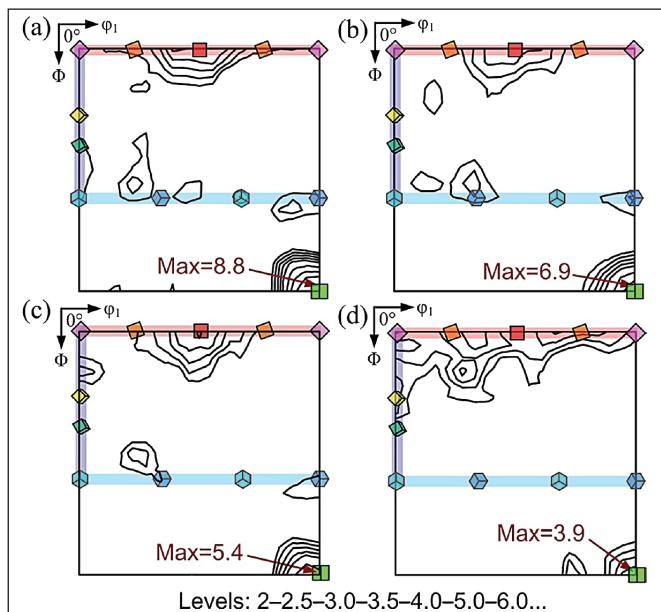
Sumber: Hirsch & Luecke (1988)

**Gambar 78.** Beberapa orientasi ideal atau komponen tekstur dari material berstruktur kubik.



Sumber: Jiao dkk. (2018)

**Gambar 79.** Tekstur khas yang muncul pada  $\varphi_2 = 45^\circ$  dari baja listrik.



Sumber: Jiao dkk. (2018)

**Gambar 80.** Tekstur FDO pada pada  $\varphi_2 = 45^\circ$  dari baja listrik, untuk kondisi pemrosesan: (a) rol dingin, (b) rol panas 17%, (c) rol panas 40%, serta (d) rol panas 55%.

# BAB V

## Aplikasi Tekstur Kristalografi (Telaah Beberapa Kasus)

Kini pengetahuan tentang analisis tekstur kristalografi dengan menggunakan *pole figure* (PF), *inverse pole figure* (IPF), serta fungsi distribusi orientasi (FDO) telah diketahui. Saatnya pengetahuan tersebut dikembangkan lebih lanjut dengan mengulas peran tekstur kristalografi dalam mendukung pemecahan permasalahan yang terjadi di industri atau di lapangan. Untuk itu, beberapa makalah ilmiah tentang kasus-kasus aplikasi yang pernah terjadi serta telah dipublikasikan di berbagai jurnal akan dibahas kembali secara lebih singkat dan efektif di sini, dengan penekanan pada signifikansi peran tekstur kristalografi. Data dan ilustrasi dari makalah-makalah ilmiah tersebut ditampilkan kembali dengan maksud membantu pembaca untuk memahami. Para pembaca diharapkan juga dapat membaca langsung ke sumber pustakanya untuk memperoleh gambaran serta penjelasan yang lebih rinci dan lengkap.

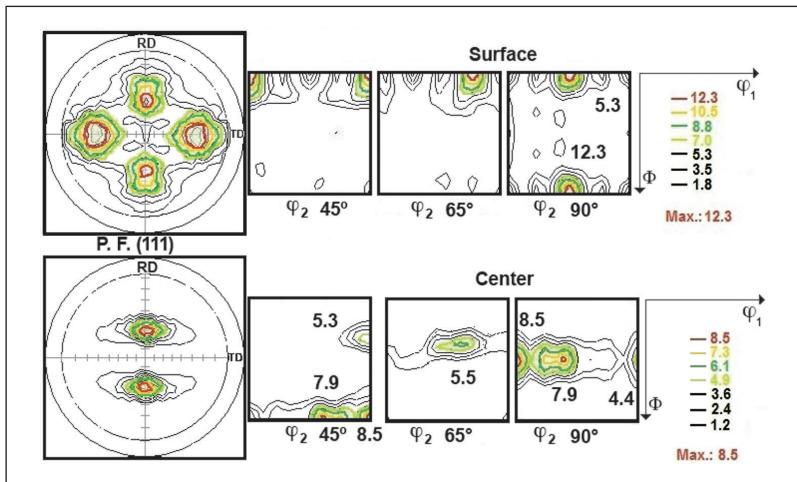
## A. Rekristalisasi dan Tekstur Kristalografi pada Lembaran Paduan Aluminium AA4006 yang Diproduksi dengan Proses *Twin Roll Caster* dan *Direct Chill* (Souza dkk., 2012)

*Twin roll caster* (TRC) dan *direct chill* (DC) adalah dua proses utama yang sering digunakan untuk memproduksi lembaran paduan aluminium. Gradien suhu terjadi pada TRC ketika gulungan lembaran paduan Al (Al-Fe-Si) atau AA4006 dihasilkan langsung dari fasa cair tanpa melalui tahap canai/rol panas, seperti pada proses DC. Permasalahan pertama terjadi ketika *solute*, seperti 1,07–1,18% silikon (Si), mengalami presipitasi dan menghasilkan fasa terner, sehingga menghambat pergerakan batas butir dan dislokasi saat proses anil. Pergerakan batas butir dan dislokasi merupakan faktor pendorong terjadinya rekristalisasi. Rekristalisasi yang terhambat ini pada akhirnya dapat menyebabkan ketidakseragaman geometri dari produk lembaran AA4006 pasca-proses *deep-drawing*, yang peruntukannya adalah buat kaleng minuman.

Investigasi terhadap rekristalisasi dan tekstur kristalografi pada lembaran AA4006 perlu dilakukan. Investigasi ini dilakukan pada lembaran AA4006, hasil proses TRC dan DC di industri Companhia Brasileira de Aluminio (CBA) yang telah dirol dingin 70% serta diberi perlakuan panas *isochronous* pada suhu 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, dan 550°C selama satu jam pada tungku QUIMIS model Q-318 D-21. Investigasi tekstur dilakukan dengan menggunakan: (1) *goniometer XRD* lateral/vertical Rigaku, dengan luaran FDO yang diolah dengan program PAT hasil pengembangan laboratorium IPEN-SP di Lima, Brasil; serta (2) *electron backscattering diffraction* (EBSD) dengan *scanning electron microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan peranti lunak/peranti keras TSL, beserta luaran berupa *orientation image microscopy* (OIM). Selain investigasi tekstur, dilakukan uji kekerasan mikro dan pengamatan dengan mikroskop optik.

Gambar 81 memperlihatkan *pole figure* (PF) serta FDO dari permukaan (*surface*) serta bagian tengah (*center*) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses TRC. Pada Gambar 81, komponen-komponen tekstur yang muncul pada permukaan sampel me-

liputi *Cube* {001}<110> yang terotasi (dengan intensitas lebih tinggi), *Cube* {001}<100>, serta {001}<310> (dengan intensitas rendah). Pada bagian tengah, komponen-komponen tekstur yang muncul, yaitu tekstur canai/rol khas yang mencakup serat- $\alpha$  (*Brass* dan *Goss*) serta serat- $\beta$ .



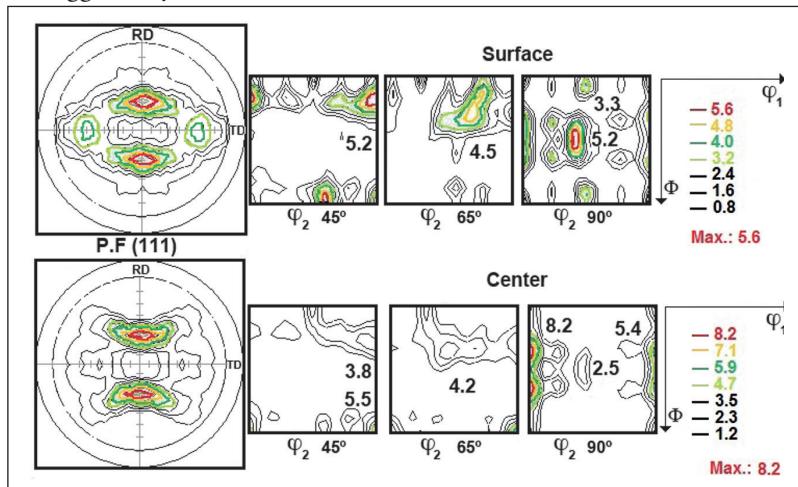
Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 81.** Pole figure (PF) dan FDO dari permukaan (surface) serta bagian tengah (center) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses TRC.

Gambar 82 memperlihatkan PF serta FDO dari permukaan (*surface*) serta bagian tengah (*center*) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses DC. Pada permukaan AA4006, hasil proses DC ini terobservasi tekstur *Cube* yang terotasi atau dikenal sebagai tekstur *shear*, serta tekstur serat {100} dengan intensitas rendah. Tekstur dengan intensitas kuat yang terobservasi di permukaan sampel ini adalah serat- $\beta$ . Sebaliknya, tekstur serat {100} terobservasi lebih kuat dan serat- $\beta$  lemah di bagian tengah dari AA4006 hasil proses DC. Tekstur serat {100} sepanjang sumbu dua kali lebih kuat di bagian tengah lembaran dibandingkan di permukaan.

Gambar 83 menunjukkan PF dan FDO dari lembaran AA4006 TRC dan DC setelah proses canai/rol dingin 70% serta anil pada suhu 400°C selama satu jam. Pada lembaran AA4006 DC, komponen tekstur *Cube* serta *Cube* yang terotasi terobservasi secara signifikan, mengin-

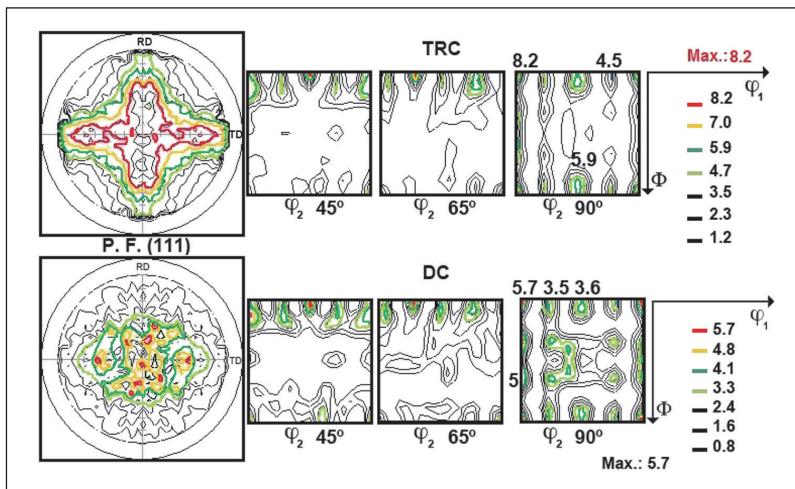
dikasikan keberadaan butiran dengan orientasi acak. Presipitasi lebih tersebar merata di lembaran AA4006 TRC dibandingkan AA4006 DC sehingga menyebabkan tekstur *Cube* mendominasi di AA4006 TRC.



Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 82.** Pole figure (PF) dan FDO dari permukaan (surface) serta bagian tengah (center) dari lembaran AA4006 yang dirol dingin 70% hasil proses DC.

Gambar 84 dan Gambar 85 menunjukkan *orientation imaging microscopy* (OIM) dari sampel lembaran AA4006 TRC dan DC yang telah dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam. Pada kedua sampel, terlihat orientasi kristal acak dari butiran, diindikasikan dengan variasi warna. Perhatikan *inverse pole figure* (IPF) yang menjadi skala legenda untuk informasi orientasi dari variasi warna tersebut. Terlihat ukuran butir pada sampel lembaran AA4006 DC (Gambar 85) lebih besar dibandingkan AA4006 TRC akibat rekristalisasi (Gambar 84). Hal ini ditengarai akibat fenomena dispersi partikel atau presipitat yang menstimulasi terjadinya nukleasi.



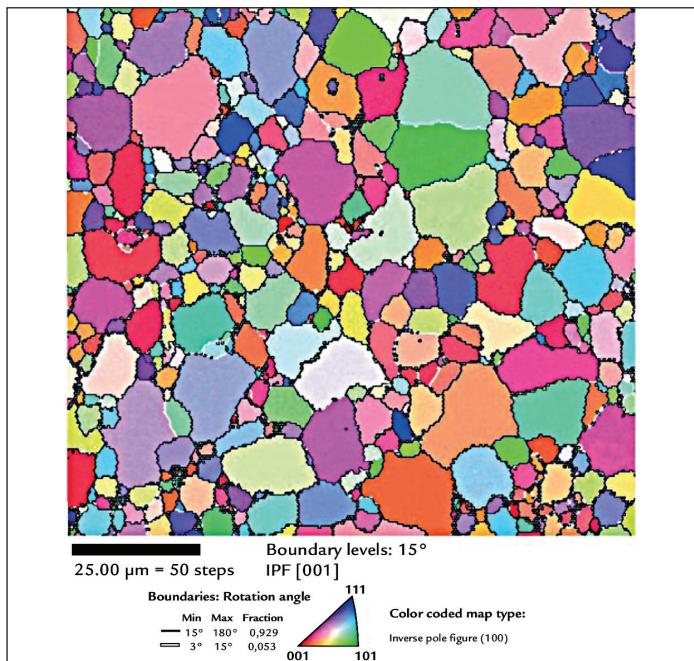
Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 83.** Pole figure (111) dan FDO untuk sampel canai/rol 70% serta anil pada 400°C selama satu jam dari lembaran AA4006 TRC dan DC.

Investigasi dan analisis tekstur kristalografi membantu menunjukkan dampak variasi proses TRC dan DC terhadap karakteristik orientasi kristal secara massal dari dua jenis sampel. Tekstur *shear* pada permukaan lembaran dan serat- $\beta$  pada bagian tengah terobservasi pada lembaran AA4006 TRC yang dirol dingin 70% tanpa dianil. Untuk kondisi proses yang sama, komponen tekstur *Cube* dan serat- $\beta$  ditemukan di permukaan dan bagian tengah lembaran AA4006 DC. OIM menunjukkan butiran berorientasi acak pada sampel lembaran TRC dan DC yang dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam serta rekristalisasi akibat nukleasi yang distimulasi oleh partikel atau presipitat.

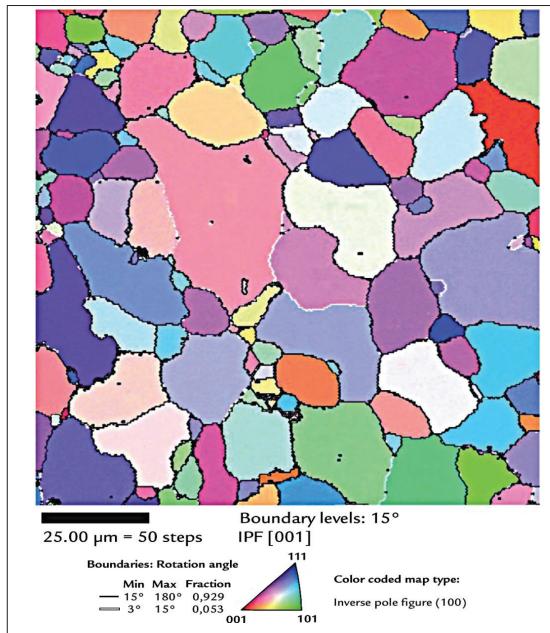
Gambar 86 menunjukkan kekerasan mikro beserta struktur mikro sampel TRC serta DC pada 150°C dan 400°C. Lembaran yang dihasilkan dengan proses TRC, serta dirol dan dianil, menunjukkan penurunan kekerasan mikro pada suhu yang lebih tinggi (sekitar 250°C) dibandingkan lembaran DC. Hal ini terjadi karena ukuran partikel (Si dan Fe) yang lebih kecil di lembaran TRC dibandingkan lembaran DC pada suhu 150°C, seperti terlihat di mikrograf pada Gambar 86.

Ukuran partikel yang lebih kecil ini menahan mobilitas sub-batas butir. Lembaran TRC juga menunjukkan kisaran suhu rekristalisasi yang lebih pendek (250–350°C) dibandingkan lembaran DC untuk kondisi canai/rol serta anil yang sama, sebagai konsekuensi potensi termodynamika yang lebih tinggi untuk rekristalisasi di lembaran TRC. Oleh karena itu, nukleasi rekristalisasi terjadi pada suhu yang lebih tinggi serta kinetika mekanismenya lebih signifikan pada lembaran TRC.



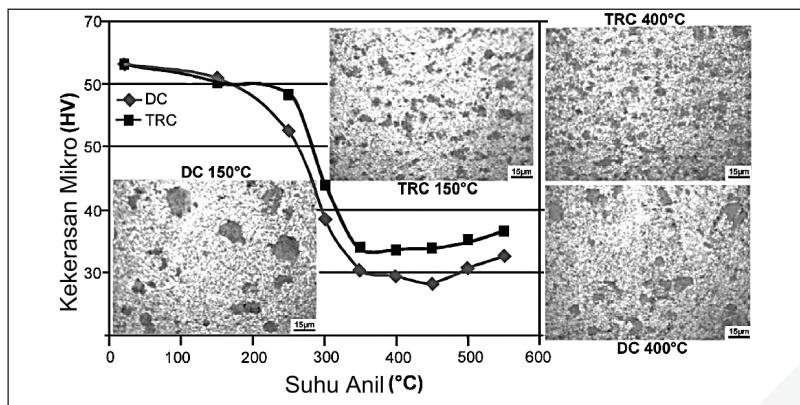
Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 84.** Orientation imaging microscopy (OIM) dari sampel lembaran AA4006 TRC yang telah dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam.



Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 85.** Orientation imaging microscopy (OIM) dari sampel lembaran AA4006 DC yang telah dirol dingin 70% serta dianil pada 400°C selama satu jam.



Sumber: Souza dkk. (2012)

**Gambar 86.** Hasil uji kekerasan mikro serta observasi dengan mikroskop optik untuk lembaran TRC dan DC.

## B. Tekstur Kristalografi dari Kapak Tembaga Prasejarah (Artioli & Dugnani, 2004)

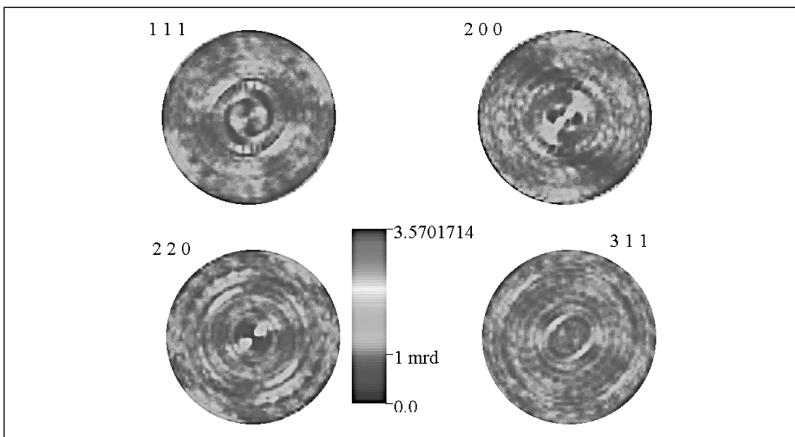
Untuk investigasi beberapa objek yang mengandung nilai sejarah atau seni tinggi, uji merusak (*destructive tests*) tidak bisa dilakukan, tidak terkecuali untuk sebuah kapak tembaga prasejarah yang ditemukan bersama mumi *Ötzi the Iceman* (Fowler, 2001) pada 1991 di Pegunungan Alpen. Mumi *Ötzi the Iceman* bersama artefaknya kini berada di South Tyrol Museum of Archaeology, Bolzano, Italia. Diperkirakan *Ötzi the Iceman* hidup sekitar 3400–3100 SM. Untuk menginvestigasi material kapak ini, integritas dan jaminan kondisi objek arkeologi harus dijaga (Rinaldi dkk., 2002). Selain tidak boleh dirusak, tantangan lain adalah ukuran kapak yang lebih besar daripada ukuran rata-rata sampel analisis tekstur. Investigasi tekstur terhadap kapak pra-sejarah ini dilakukan untuk mengetahui latar belakang teknik manufaktur prasejarah yang digunakan untuk membuatnya. Metode yang dipergunakan untuk investigasi tekstur kristalografi dari kapak ini adalah dengan difraksi berkas neutron pada difraktometer dua sumbu D20 di Institut Laue-Langevin (ILL), Grenoble, Prancis.

Gambar 87 memperlihatkan pole figure (PF) 111, 200, 220, dan 331 dari bagian tengah kapak tembaga tersebut. Dari variasi PF ini, terlihat bahwa kapak tembaga ini tidak memiliki tekstur tertentu atau orientasi pilihan (*preferred orientations*). Ini berarti bahwa pada zaman prasejarah, pembuatan kapak tembaga ini dilakukan dengan cukup peleburan serta pengecoran ke cetakan. Tidak ada proses pembentukan logam dan perlakuan panas terhadap benda coran.

## C. Analisis Tekstur Kristalografi dari Paduan Ti6Al4V Hasil Proses *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) (Muiruri dkk., 2020)

Paduan Ti6Al4V yang diproses dengan *3-D printing* atau *additive manufacturing* telah banyak diteliti dari berbagai aspek, seperti karakterisasi serbuk, tegangan sisa, porositas, serta perlakuan panas termasuk aplikasi *hot isostatic pressing* (HIP). Kebanyakan penelitian tersebut dilakukan untuk memperoleh komponen Ti6Al4V yang memiliki sifat

lebih unggul dibandingkan Ti6AlV, yang dimanufaktur secara konvensional via pengecoran, canai/rol, dan tempa. Aplikasi paduan Ti6AlV biasanya untuk komponen-komponen fungsional, seperti mesin turbin dan implan tulang.



Sumber: Artioli & Dugnani (2004)

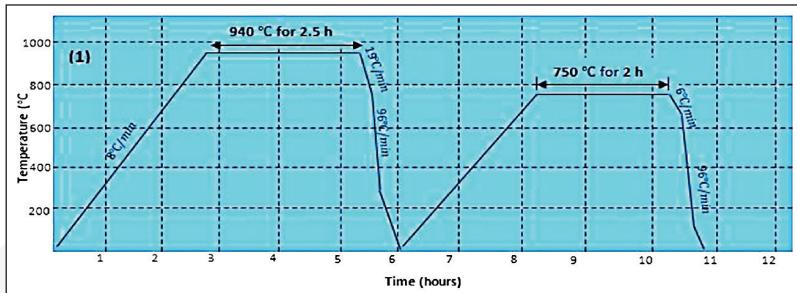
**Gambar 87.** Pole figure (PF) dari kapak tembaga *Ötzi the Iceman* dengan struktur kristal yang *texturless*.

Kali ini, investigasi dilakukan terhadap tekstur kristalografi dari paduan Ti6Al4V yang diproses dengan teknik *direct metal laser sintering* (DMLS). DMLS atau disebut juga *selective laser sintering* (SLS) adalah salah satu tipe *additive manufacturing* atau *3D printing*, digunakan untuk menghasilkan prototipe secara cepat dan produksi massal komponen-komponen logam (Jones, 2021). Metode DMLS hampir serupa dengan *selective laser melting* (SLM) atau disebut juga *direct metal laser melting* (DMLM). Perbedaannya adalah pada DMLS serbuk hanya tersinter (tidak terlebur) di tingkatan molekul hingga menghasilkan komponen dengan porositas yang jauh berkurang. Keunggulan lain dari DMLS adalah kemampuan mencetak (*printing*) paduan yang mengandung berbagai material dengan titik-titik lebur yang berbeda, termasuk mengombinasikan logam dan plastik seperti pada alumida yang merupakan gabungan dari serbuk nilon dengan serbuk aluminium. DMLM memanaskan serbuk logam hingga meleleh, sedangkan

DMLS tidak sampai meleleh sehingga energi yang dibutuhkan DMLS lebih rendah.

Tujuan penelitian ini adalah menginvestigasi tekstur kristalografi dari struktur martensit, *basketweave*, serta Widmanstätten pada paduan Ti6Al4V yang diproses dengan DMLS. Struktur-struktur ini biasanya terbentuk dengan perlakuan panas dari struktur martensit pada suhu pas di bawah dan di atas suhu transformasi yang diikuti dengan pendinginan pada tungku (*furnace cooling*).

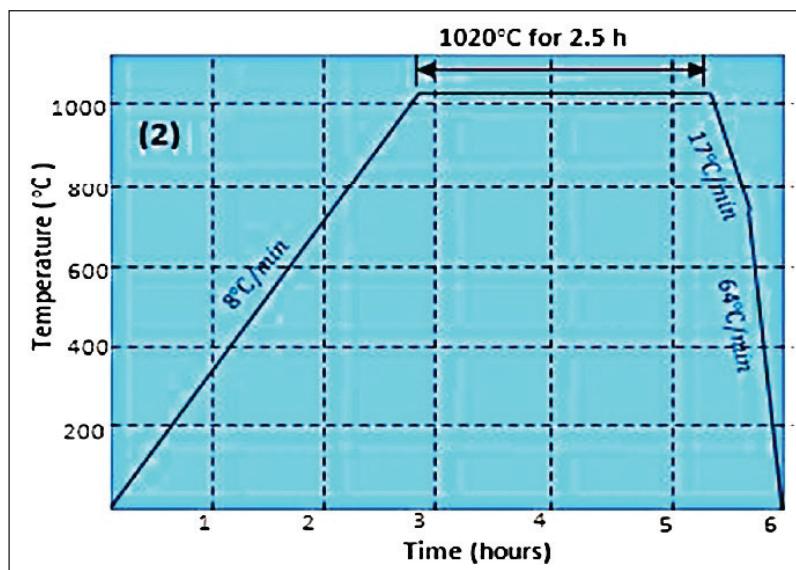
Sampel Ti6Al4V yang diproses dengan DMLS diberi dua jenis perlakuan panas dengan laju pemanasan dan pendinginan yang diatur (*controlled heating and cooling rates*). Perlakuan panas pertama (Siklus 1) terdiri atas dua kali pemanasan, yaitu pertama pada 940°C selama dua setengah jam dan setelah *rapid cooling* dilanjutkan dengan pemanasan kedua pada 750°C selama dua jam (Gambar 88). Perlakuan panas kedua (Siklus 2) cukup dengan satu kali pemanasan, yaitu pada suhu 1020°C selama dua setengah jam (Gambar 89). Karakterisasi struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik A ZEISS Axio Scope A1 yang dilengkapi dengan *software* Axio Vision SE6E untuk menangkap citra optik dari sampel dietsa. Investigasi tekstur kristalografi dilakukan dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) JEOL JSM-7001F yang dilengkapi dengan analisis *electron back scattering diffraction* (EBSD). Sistem EBSD dilengkapi dengan kamera sensitif rendah cahaya (CCD) dan *software* manipulasi serta akuisisi data *HKL channel 5*. Analisis tekstur disampaikan dalam bentuk *orientation image microscopy* (OIM) dan *pole figure* (PF).



Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 88.** Perlakuan Panas Siklus 1

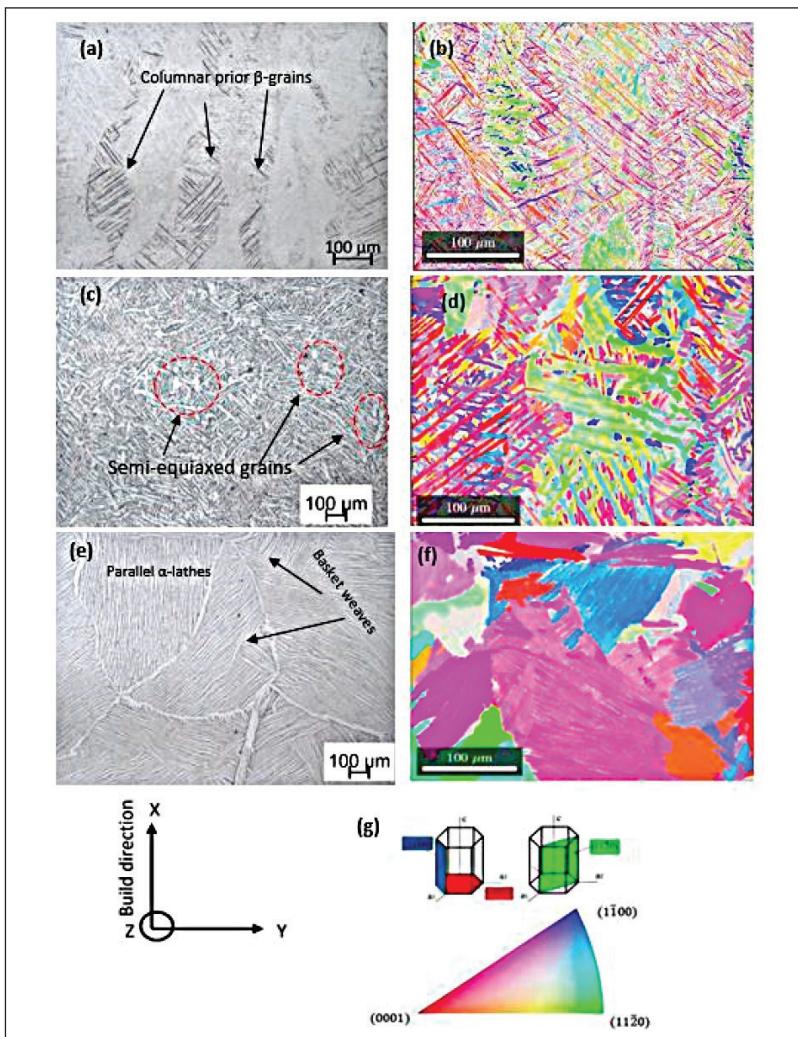
Gambar 90 memperlihatkan struktur mikro beserta OIM yang terkait dengan hasil analisis EBSD dari sampel A yang tidak diberi perlakuan panas (Gambar 90a dan 90b), sampel B yang diberi perlakuan panas Siklus 1 (Gambar 90c dan 90d), serta sampel C yang diberi perlakuan panas Siklus 2 (Gambar 90e dan 90f). Pada sampel A (Gambar 90a), terlihat butiran kolumnar dengan ketebalan 100–200  $\mu\text{m}$ , tumbuh secara epitaksial dan berlapis sepanjang arah sinter. Fasa yang berbentuk jarum dengan ketebalan 0,5–1,5  $\mu\text{m}$  tumbuh di bagian dalam butiran kolumnar fasa  $\beta$  dan meluas hingga beberapa ratus mikrometer, tetapi tidak melebihi lebar butiran kolumnar. Pada sampel B (Gambar 90c), terjadi struktur mikro dua fasa yang cukup besar-besaran (*coarse bi-phase*). Fasa  $\alpha$  yang berbentuk jarum di sini memiliki dimensi panjang x tebal rata-rata 150  $\mu\text{m}$  x 6  $\mu\text{m}$ . Pada sampel C (Gambar 90e), fasa  $\alpha/\beta$  mengambil bentuk lamelar, yakni struktur jarumnya tumbuh selang-seling menghasilkan jaringan *basketweave*.



Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 89.** Perlakuan Panas Siklus 2

Gambar 90b adalah *orientation image microscopy* (OIM) dari sampel A pada Gambar 5.10a. Pada Gambar 90b, terlihat bahwa fasa martensit berbentuk jarum yang memiliki orientasi acak. Orientasi acak dari fasa didominasi oleh arah-arah antara bidang {0001} dan {1100}, seperti terlihat pada *inverse pole figure* (IPF) di bagian bawah. Pada Gambar 90d, yaitu OIM dari sampel B pada Gambar 90c, terlihat bahwa beberapa orientasi butiran  $\alpha$  cenderung berulang di dalam butir berfasa  $\beta$ , diindikasikan oleh pengulangan warna dari fasa berbentuk jarum ini. Pada Gambar 90f, yaitu OIM dari sampel C pada Gambar 90e, terlihat fasa  $\beta$  dengan butiran berbentuk *equiaxed* dan *semi-equiaxed* beserta peta orientasinya yang menunjukkan berbagai koloni. Setiap koloni memiliki orientasi fasa  $\alpha$  yang sama, dengan orientasi didominasi oleh arah antara bidang {0001} dan {1100}.

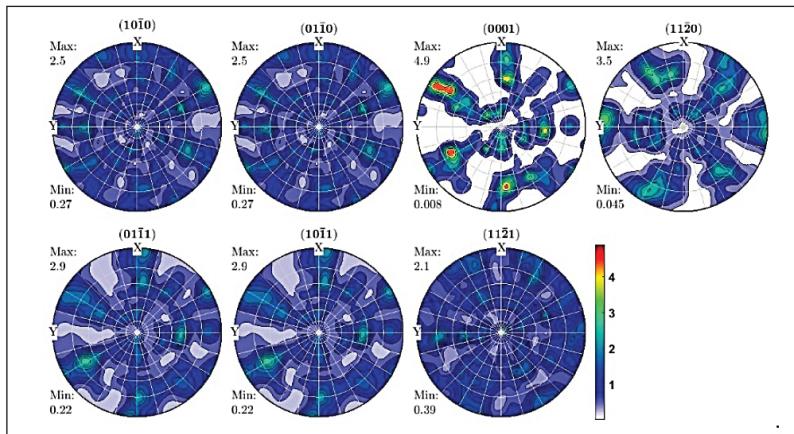


Ket.: (a)(b) A tidak dipanaskan, (c)(d) B dipanaskan Siklus 1, serta (e)(f) C dipanaskan Siklus 2.

Sumber: Muiruri dkk. (2020)

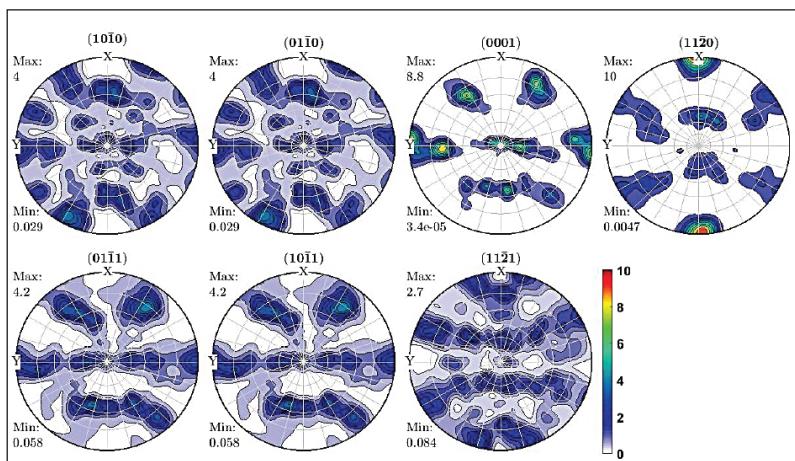
**Gambar 90.** Struktur Mikro dan OIM dari Sampel

Gambar 91 sampai Gambar 93 menunjukkan PF dari fasa  $\alpha$ /  $\alpha'$  untuk sampel A, B, dan C. Tabel 8 merangkum intensitas tekstur kristalografi dari ketiga sampel terhadap bidang-bidang  $(10\bar{1}0)$ ,  $(01\bar{1}0)$ ,  $(0001)$ ,  $(11\bar{2}0)$ ,  $(01\bar{1}1)$ ,  $(10\bar{1}1)$ , dan  $(11\bar{2}1)$ .



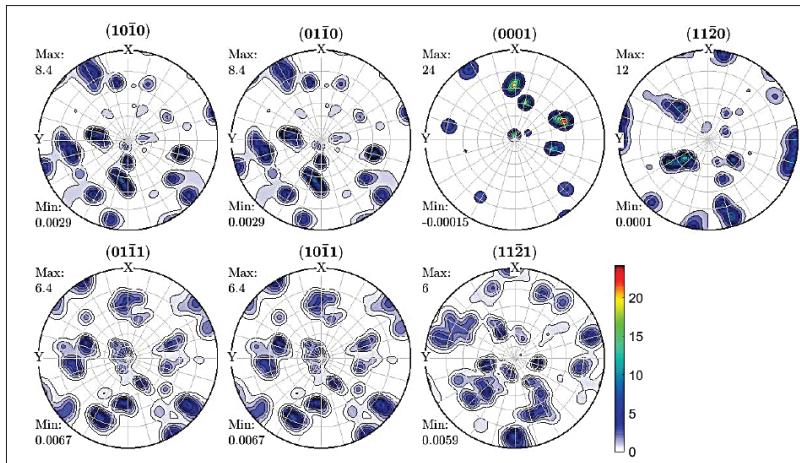
Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 91.** PF fasa  $\alpha/\alpha'$  untuk sampel A yang tidak mengalami perlakuan panas.



Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 92.** PF fasa  $\alpha/\alpha'$  untuk sampel B yang mengalami perlakuan panas Siklus 1.



Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 93.** PF fasa  $\alpha/\alpha'$  untuk sampel C yang mengalami perlakuan panas Siklus 2.

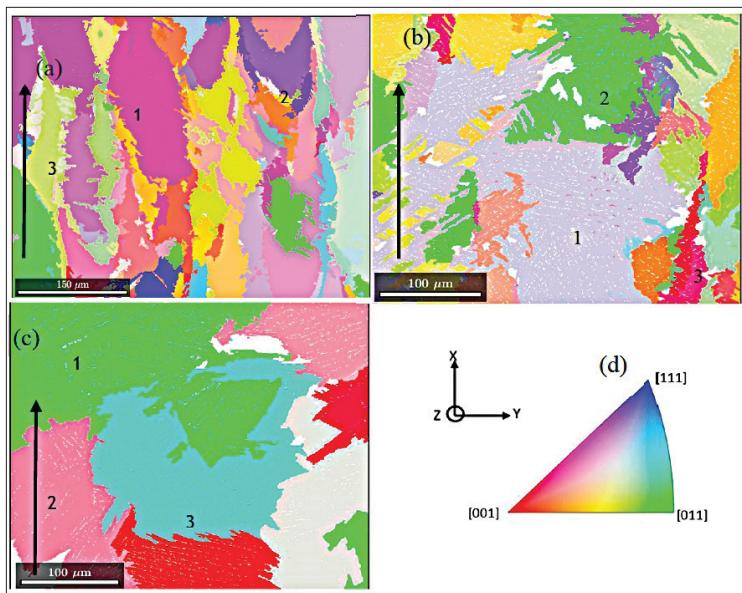
Dari Gambar 91 sampai Gambar 93 terlihat bahwa orientasi fasa  $\alpha/\alpha'$  berbeda-beda. Dari Tabel 8 terlihat bahwa intensitas paling rendah terjadi pada Sampel A yang tidak mengalami perlakuan panas, dengan jangkauan intensitas  $2,1 \leq I \leq 4,9$ . Intensitas kemudian meningkat untuk Sampel B dengan jangkauan  $4,0 \leq I \leq 10,0$  dan tertinggi pada Sampel C dengan jangkauan  $6,0 \leq I \leq 24,0$ . Peningkatan intensitas ini disebabkan oleh terbentuknya koloni-koloni butiran  $\alpha$  yang mengandung fasa jarum  $\alpha$  dengan orientasi kristalografi yang sama. Hal ini juga mengindikasikan terjadinya agregasi varian yang signifikan dan efektif pasca-perlakuan panas.

Gambar 94 menunjukkan *image orientation microscopy* (IOM) dari fasa  $\beta$ , sedangkan Gambar 95 memperlihatkan PF dari fasa  $\beta$ . PF dari sampel A dan B pada Gambar 95a dan 95b menunjukkan bahwa orientasi kristal dengan intensitas yang kuat terjadi pada arah X pada PF (100). Karakteristik pertumbuhan tekstur serat dari butiran  $\beta <100>$  yang searah atau hampir searah dengan arah sinter (arah X) pada paduan Ti6Al4V telah banyak dilaporkan sebelumnya.

**Tabel 8.** Ringkasan intensitas maksimum dari beberapa bidang pada Sampel A, B, dan C.

Bidang	(1010)	(0110)	(0001)	(1120)	(0111)	(1011)	(1121)
Sampel	Intensitas Maksimum ( <i>Multiple Unit Density, MUD</i> )						
A	2,5	2,5	4,9	3,5	2,9	2,9	2,1
B	4,0	4,0	8,8	10,0	4,2	4,2	2,7
C	8,4	8,4	24,0	12,0	6,4	6,4	6,0

Sumber: Muiruri dkk. (2020)

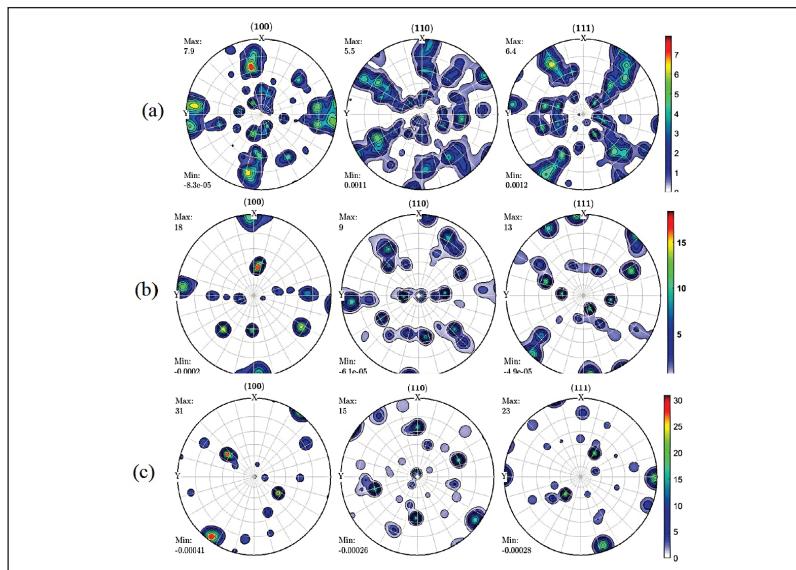


Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 94.** *Orientation Image Microscopy (OIM)* dari Fasa  $\beta$

## D. Orientasi Tekstur dan Kristalografi Apatit Biologis (BAp) sebagai Indeks Baru untuk Mengkaji Struktur Mikro dan Fungsi Tulang yang Diregenerasi dengan Rekayasa Jaringan (Nakano dkk., 2012)

Teknik rekayasa jaringan telah begitu berkembang untuk pemulihan dan peningkatan fungsi serta struktur jaringan yang hilang (Langer & Vacanti, 1993; Patrick dkk., 1998; Mooney & Mikos, 1999). Dewasa ini, pemulihan tulang yang beregenerasi umumnya dievaluasi dari bentuk tulang secara makroskopis dan kepadatan mineral tulang (*bone mineral density/BMD*). BMD diukur secara kuantitatif dari kepadatan apatit biologis (BAp) dan belum tentu dapat diterapkan untuk memperkirakan pemulihan struktur mikro dan fungsi tulang. Diperlukan indikator lain tentang kualitas tulang yang dapat digunakan untuk mengevaluasi struktur mikro dan fungsi mekanik tulang sekaligus menentukan derajat regenerasi tulang.



Ket.: (a) Sampel A, (b) Sampel B, dan (c) Sampel C.

Sumber: Muiruri dkk. (2020)

**Gambar 95.** PF (100), (110), dan (111) untuk Fasa  $\beta$

Pada jaringan keras, seperti tulang dalam tubuh manusia, nanokristal BA<sub>p</sub> merupakan senyawa yang dominan dengan struktur heksagonal (Elliott, 1994). Sumbu c pada struktur heksagonal BA<sub>p</sub> berorientasi sejajar dengan kolagen fibril (Nakano dkk., 2012). Ketidaksimetrisan kristalografi yang berbasis anistropi dari BA<sub>p</sub> dan molekul kolagen ini menjadi salah satu faktor yang mengendalikan fungsi mekanik dari jaringan keras (Sasaki dkk., 1989; Bonfield & Grynpas, 1977; Ziv dkk., 1996).

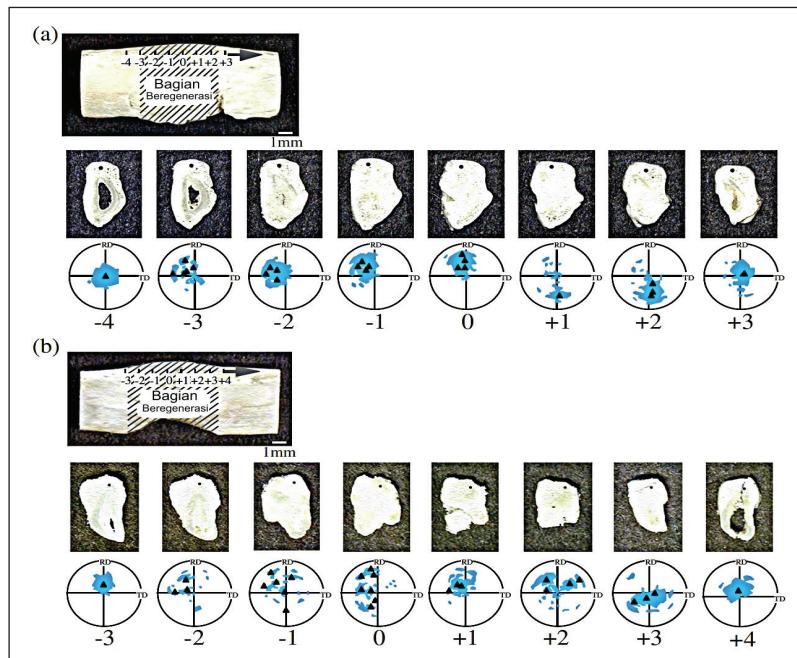
Dalam penelitian ini, regenerasi jaringan keras dievaluasi melalui observasi tekstur dan orientasi BA<sub>p</sub>. Orientasi dan tekstur pilihan dari kristalit BA<sub>p</sub> pada jaringan utuh dan beregenerasi dari ulna dan tengkorak kelinci diinvestigasi menggunakan sistem difraktometer sinar-X berkas mikro. Proses regenerasi tulang dianalisis dengan fokus pada distribusi spasial dari rasio intensitas difraksi serta analisis *pole figure* (PF) dari bagian yang beregenerasi.

Metode eksperimen pada penelitian ini terbagi atas dua bagian: (1) Penyiapan faktor pertumbuhan *fibroblast* dasar (*basic fibroblast growth factor*, bFGF) yang mengandung *hidrogel gelatin*; serta (2) uji coba ke hewan (Nakano dkk., 2012). Perincian dari dua bagian eksperimen ini tidak dibahas di buku ini, tetapi dapat dilihat secara detail di referensi terkait (Nakano dkk., 2012).

Gambar 96 memperlihatkan PF (002) dari bagian tulang kortikal dari ulna kelinci yang telah mengalami regenerasi empat minggu pasca-operasi. Gambar 96a menunjukkan hasil dengan bFGF, sedangkan Gambar 96b tanpa bFGF. Di bagian tulang yang asli, intensitas terkuat dapat diamati di tengah PF seperti terlihat pada posisi -4 dan +3. Sementara pada tulang yang beregenerasi, antara posisi -2 dan +2, intensitas PF (002) cenderung tersebar dan intensitas maksimum sering kali menyimpang dari pusat PF. Pemanfaatan bFGF menyebabkan penyelarasan sumbu c dari BA<sub>p</sub> pada tulang yang beregenerasi lebih mirip dengan tulang utuh (Gambar 96a) dibandingkan tanpa bFGF (Gambar 96b).

Gambar 97 menunjukkan variasi distribusi sumbu c dari kristal BA<sub>p</sub> selama rekonstruksi dengan pelepasan terkontrol dari bFGF.

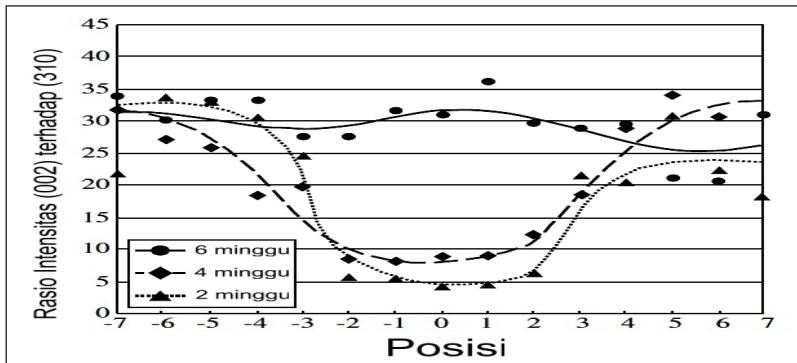
Distribusi tersebut diindikasikan dengan intensitas relatif dari puncak difraksi (002) terhadap (310) pada profil sinar-X tulang kortikal di sisi lateral. Pada minggu kedua dan keempat pasca-operasi, bagian yang beregenerasi menunjukkan distribusi sumbu c yang lebih rendah dibandingkan bagian asli. Namun, di atas enam minggu, perataan preferensial dari sumbu c pulih kembali seperti pada tulang asli. Hal ini menunjukkan perbaikan dari pemerataan BA<sub>p</sub> terjadi setelah pemulihan morfologi tulang. Perlu dicatat bahwa regenerasi morfologi tulang belum tentu sesuai dengan pemulihan keselarasan BA<sub>p</sub>.



Ket.: (a) dengan bFGF, dan (b) tanpa bFGF.

Sumber: Nakano dkk. (2012)

**Gambar 96.** Variasi intensitas difraksi PF (002) pada tulang kortikal dari ulna kelinci empat minggu setelah operasi.



Sumber: Nakano dkk. (2012)

**Gambar 97.** Variasi distribusi relatif dari sumbu c BAp selama masa rekonstruksi dengan pelepasan bFGF terkontrol.

### E. Tekstur Kristalografi pada Baja Rol Panas (Raabe, 2003)

Analisis tekstur kristalografi secara kuantitatif dengan penggunaan fungsi distribusi orientasi (FDO) pada baja rol panas sejak awal 1980-an telah menghasilkan gambaran yang cukup lengkap tentang evolusi tekstur rol panas dari baja berstruktur BCC dan FCC. Penggunaan FDO memberikan data tekstur baja rol panas yang cukup rinci untuk menunjukkan berbagai perbedaan karakteristik dari berbagai varian grup baja. Tabel 9 merangkum parameter-parameter kunci dari tekstur kristalografi baja rol panas.

**Tabel 9.** Parameter-parameter utama untuk berbagai kelas tekstur baja rol panas.

Grup Utama dari Parameter-parameter yang Berpengaruh pada Tekstur Baja Rol Panas	Faktor-faktor Utama di Setiap Grup Parameter
Grup 1 (pemrosesan)	Kondisi pengecoran (contoh: <i>continuous casting</i> , <i>thin strip casting</i> ) Perlakuan lempeng ( <i>slab treatment</i> ) (contoh: suhu anil, waktu perendaman) <i>Pra-canai/prä-rol (pre-rolling)</i> Jadwal canai/rol panas (contoh: canai/rol feritik, canai/rol austenitik, skema reduksi, profil laju regangan makroskopik melalui ketebalan
Grup 2 (termodinamika)	Jumlah dan jenis elemen pemanas Pengotor Energi deformasi yang disimpan Perilaku transformasi Energi salah susun ( <i>stacking fault energy</i> ) pada austenit
Grup 3 (struktur mikro)	Ukuran dan bentuk butir Suhu dan waktu rekristalisasi Pita-pita geser ( <i>shear bands</i> ) Presipitasi
Grup 4 (kristalografi)	Sistem <i>slip</i> aktif Tekstur turunan ( <i>inherited textures</i> ) Hubungan-hubungan orientasi selama transformasi

Sumber: Raabe (2003)

Terdapat tiga klasifikasi grup baja berbasis tekstur kristalografi hasil proses rol panas, yaitu

- 1) Grup A terdiri atas besi murni, intermetalik berstruktur ikatan lemah B2 dan  $DO_3$ , serta baja karbon rendah feritik bebas interstisi (*interstitial free*, IF);
- 2) Grup B terdiri atas baja tahan karat feritik paduan tinggi dan baja silikon, sebagai contoh baja dengan kandungan 10–17% berat Cr, atau 3% berat Si, serta logam-logam transisi BCC, seperti Ta, Mo, Cr, dan Nb, yang tidak mengalami transisi fasa selama rol panas; dan

- 3) Grup C seperti baja tahan karat austenitik yang stabil ataupun tidak stabil, seperti baja dengan kandungan Cr, Mn, atau Ni yang lebih tinggi serta baja dupleks.

Pembahasan aplikasi baja rol panas di Subbab E ini difokuskan hanya pada baja Grup A untuk memberikan gambaran dasar tekstur kristalografi pada material baja yang dirol panas. Pembaca dipersilakan untuk membaca lebih lanjut dengan saksama tentang karakteristik tekstur pada baja Grup B dan Grup C pada referensi terkait oleh Di-  
erk Raabe dari Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Jerman (Raabe, 2003).

Percobaan untuk Grup A dilakukan pada sampel-sampel baja yang dirol panas di industri hingga ketebalan 3–4 mm. Karena tekstur dan struktur mikro baja rol panas sangat tidak homogen pada arah normal ND (*normal direction*), semua spesimen diukur pada berbagai lapisan ketebalan. Beberapa tekstur rol panas dengan ketidakhomogenan yang kuat bahkan diinvestigasi pada 11 variasi lapisan ketebalan. Parameter yang digunakan untuk mengobservasi dan menganalisis tekstur rol panas ini adalah

$$s = 2a/d \quad \text{Persamaan 5.1}$$

Di mana:

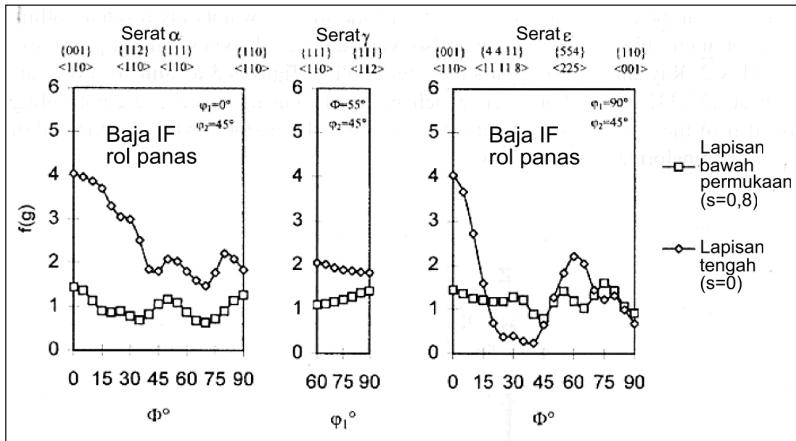
a = jarak lapisan “*of interest*” dari lapisan tengah

d = ketebalan spesimen.

Sebagai contoh,  $s = 0$  berkorespondensi dengan lapisan tengah dan  $s = 1$  identik dengan permukaan sampel. Parameter  $s = 0$ ,  $s = 0,7$ , dan  $s = 0,8$  erat kaitannya dengan analisis tekstur rol panas karena tekstur *plane-strain* terjadi pada  $s = 0$  serta tekstur *shear* pada  $s = 0,7$  dan  $s = 0,8$  pada rol panas skala industri. Untuk membuang lapisan hasil preparasi metalografi setebal 20  $\mu\text{m}$ , spesimen baja Grup A dietsa dengan larutan 100 ml  $\text{H}_2\text{O}$ , 10 ml HF, 5 ml  $\text{HNO}_3$ , serta 5 ml HCL.

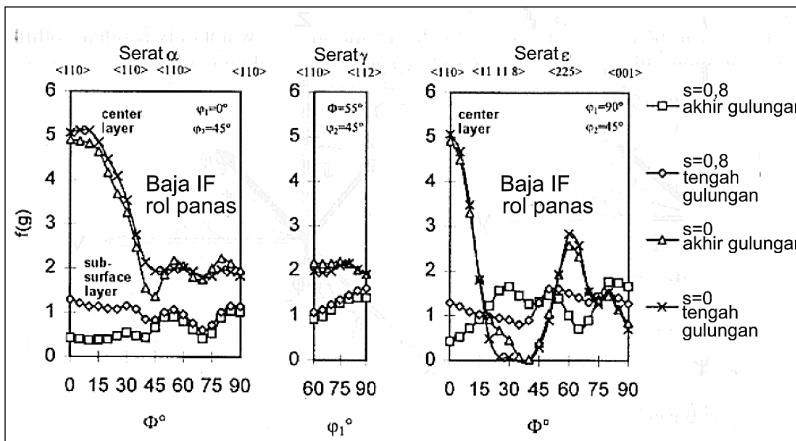
Gambar 98 dan Gambar 99 memperlihatkan bahwa baja yang di-manufaktur pada rezim feritik menunjukkan tidak hanya tekstur canai/rol sisu, tetapi juga gradien tekstur searah ND dan *in-plane* yang lemah

setelah pendinginan. Sebagai pembanding, baja karbon rendah yang dimanufaktur dengan strategi rol panas austenitik kebanyakan menunjukkan tekstur yang mendekati acak di bagian akhir gulungan.



Sumber: Juntunen dkk. (2001)

**Gambar 98.** Ketidakhomogenan tekstur pada baja IF rol panas (Grup A) searah ND dari gulungan.

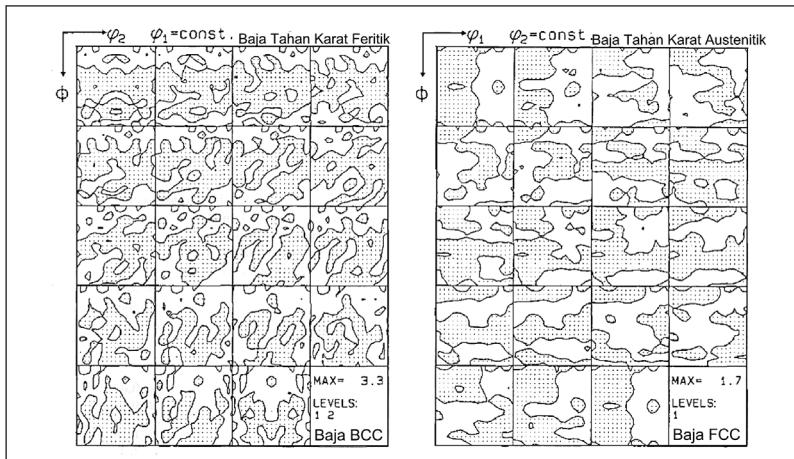


Sumber: Juntunen dkk. (2001)

**Gambar 99.** Ketidakhomogenan Tekstur pada Baja IF (Grup A) di Bidang Lembaran dari Gulungan Rol Panas

Tekstur-tekstur serupa, seperti pada Gambar 98 dan Gambar 99, dengan penyebaran orientasi serat tipe *cube* yang acak atau lemah juga terobservasi pada baja tahan karat austenitik dan feritik paduan tinggi, baja karbon rendah, serta baja silikon hasil manufaktur dengan *strip casting*, seperti terlihat pada Gambar 100 dan Gambar 101 (Raabe, 1995b; Raabe, 1997; (Raabe, Hoelscher, dkk., 1993); Raabe, 1996; (Raabe, Reher, dkk., 1993) ; Raabe dkk., 1994). Dalam hal ini, baja tahan karat *strip casting* biasanya menunjukkan struktur mikro yang tidak homogen dalam arah ND. Lapisan permukaan atau mendekati bagian tengah lembaran dicirikan dengan blok-blok dendrit seragam dan besar, sedangkan di bagian tengah menunjukkan dendrit berbentuk *equiaxed*. Pada lapisan ketebalan sedang (*mid-layer*), terdapat struktur butiran yang globulitis. Baja austenitik yang tidak stabil juga bisa menunjukkan sampai dengan 20% volume martensit di lapisan tengah (Raabe, 1995b; Raabe, 1995a).

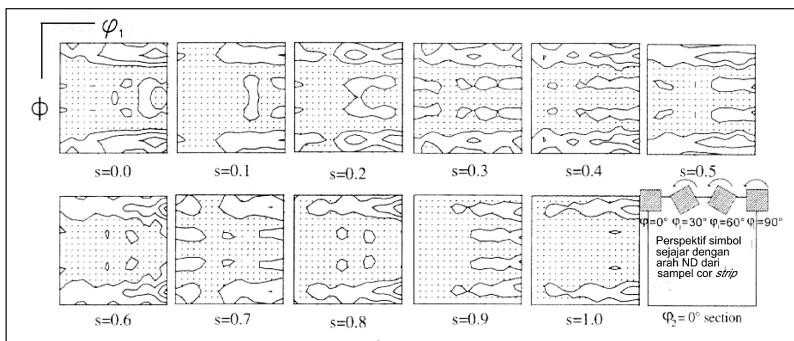
Baja tahan karat feritik dan austenitik menunjukkan distribusi orientasi yang mendekati acak searah ND pasca-proses *strip casting*. Gradien tekstur di antara kedua jenis paduan baja tahan karat ini tidak terlalu berbeda. Tekstur lembaran baja *strip casting* biasanya tidak simetris di kedua sisi relatif terhadap lapisan tengah.



Ket.: (a) baja tahan karat feritik (kiri), dan (b) baja tahan karat austenitik (kanan) di lapisan tengah.

Sumber: Raabe (1995b); Raabe (1995a)

**Gambar 100.** Contoh Tekstur Lemah dari Grup A



Sumber: Raabe (1995a); Raabe (1995b)

**Gambar 101.** Contoh tekstur lemah dalam arah ND (*through-thickness*) dari baja tahan karat austenitik (Grup A), hasil proses *strip casting*, dicirikan dengan tekstur serat proses solidifikasi.



# BAB VI

## Penutup

Adalah penting untuk menarik benang merah dalam pembahasan tekstur kristalografi dari Bab I sampai Bab V. Empat faktor utama dalam ilmu dan teknik material yang dibahas pada Bab I, yaitu (1) struktur material, (2) pemrosesan material, (3) sifat material, serta (4) performa material, kini semakin jelas interkorelasinya melalui analisis dan kajian tekstur kristalografi. Analisis dan kajian tekstur kristalografi diperlukan untuk mengetahui serta memahami anisotropi sifat suatu senyawa, material, produk, atau komponen sebagai hasil dari tahapan proses, manufaktur, atau sintesis. Anisotropi sifat material ini bisa berpengaruh pada unjuk kerja dari senyawa, material, produk, atau komponen tersebut ketika merespons kondisi eksternal. Bidang ilmu yang membutuhkan investigasi tekstur kristalografi tidak terbatas pada bidang ilmu metallurgi dan material, tetapi bisa juga bidang teknik lainnya, hayati, bahkan sosial kemasyarakatan, selama investigasi itu memerlukan informasi tentang struktur dan orientasi kristal dari suatu obyek “*of interest*”.

Observasi dan pengukuran data primer untuk tekstur kristalografi dilakukan dengan menggunakan berkas sinar-X, berkas neutron, atau

elektron hamburan balik. Peralatan yang dibutuhkan untuk analisis tekstur kristalografi mencakup (1) difraktometer atau *goniometer XRD* berkas elektron atau neutron, serta (2) *scanning electron microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan detektor *electron back scattering diffraction* (EBSD). Hasil olahan data tekstur kristalografi disampaikan terutama dalam bentuk: (1) *pole figures* (PF), (2) *inverse pole figures* (IPF), serta (3) fungsi distribusi orientasi (FDO) pada ruang tiga dimensi Euler. PF dan FDO biasanya digunakan untuk menganalisis makrotekstur, sedangkan IPF untuk mikrotekstur dengan dukungan *orientation image microscopy* (OIM). Data primer yang dideteksi oleh difraktometer/goniometer dan EBSD perlu diolah dengan berbagai aplikasi komputer atau *software* (*open source* ataupun berbayar) yang dapat menghasilkan PF, IPF, FDO, serta OIM.

Pembahasan dan interpretasi PF, IPF, FDO, serta OIM perlu memperhatikan serta berkesinambungan dengan sifat atau performa material yang menjadi “*topic of interest*”, sehingga hipotesis dan tujuan penelitian atau investigasi tetap terdukung. Selain itu, perlu memperhatikan dan menghubungkan data olahan pada PF, IPF, FDO, serta OIM dengan: (1) simetri sampel, (2) simetri kristal, (3) komponen-komponen tekstur utama, serta (4) arah sampel RD-TD-ND.

Di masa mendatang, pemahaman terhadap investigasi dan analisis tekstur kristalografi serta penggunaannya di bidang penelitian, perekayasaan, dunia pendidikan tinggi, serta industri di Indonesia dapat meningkat. Hal ini dapat dimulai dengan diseminasi pengetahuan tekstur kristalografi melalui bangku pendidikan tinggi dan pelatihan teknis. Sembari meningkatkan dan/atau merevitalisasi peralatan difraktometer/*goniometer* berkas elektron atau neutron serta SEM-EBSD, para peneliti, perekayasa, dan akademisi pendidikan tinggi diharapkan mampu menghasilkan publikasi-publikasi nasional ataupun global tentang tekstur kristalografi serta menjawab permasalahan teknis di industri yang terkait dengan tekstur kristalografi. Sampel-sampel lama hasil litbang sebelumnya kini dapat digunakan kembali untuk menginvestigasi tekstur kristalografi.

## Referensi

- 1 typical textures part 1 thermomechanical processing TMP. (t.t.). SlideToDoc. Diakses pada 9 Mei 2021 dari <https://slidetodoc.com/1-typical-textures-part-1-thermomechanical-processing-tmp/>
- 3d coordinate axis vector stock vector. Illustration of function–67829314. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-d-coordinate-axis-vector-image-white-image67829314>
- Aniswatin, K., Risanti, D. D., & Pramono, A. W. (2013). Analisis orientation distribution function (ODF) unsur Nb dan senyawa intermetalik superkonduktor Nb<sub>3</sub>Sn. *Jurnal Teknik POMITS*, 2(2), F268–273.
- Aniswatin, K., Risanti, D. D., & Pramono, A. W. (2014). Macrotecture study of non- and sintered pure Nb and Nb<sub>3</sub>Sn using orientation distribution function. *Advanced Materials Research*, 896, 638–641.
- Artioli, G., & Dugnani, M. (2004). Crystallographic texture analysis: Applications in mineralogy and archaeometry. *Periodico di Mineralogia*, 73, 5–16.
- Atkins, P., & Jones, L. (1997). *Chemistry: Molecules, matter, and change* (3rd ed.). W H Freeman & Co.

- Baak, N. T., & Simmons, R. H. (1967). *X-ray diffraction goniometer wherein the specimen is stationary and the source and detector are movable* (Nomor Paten US3322948A). United States of America.
- Backscattered electrons. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://www.mse.iastate.edu/research/microscopy/how-does-the-sem-work/high-school/how-the-sem-works/backscattered-electrons/>
- Basori, I., Angela, I., Jendra, D., & Sofyan, B. T. (2018). Deformation characteristics and texture development of Bi-added of Cu-29Zn alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 378 012015.
- Bassani, G., Liedl, G. L., & Wyder, P. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of condensed matter physics* (1st ed.). Academic Press.
- Bhadeshia123. (2012, 15 April). Stereogram and Wulff Net -3 [Video file]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=LDunw3cZsaw>
- Bonfield, W., & Grynpas, M. D. (1977). Anisotropy of Young's modulus of bone. *Nature*, 270, 453–454.
- Bouhattate, J. (2006). *Modeling texture evolution in polycrystalline materials using spherical harmonics* [Disertasi]. Florida State University.
- Bragg, W. H. (1907). The nature of Roentgen rays. *Transactions of the Royal Society of Science Australia*, 31, 94–98.
- Bragg, W. H. (1908). The nature of x-rays. *Nature*, 78, 665.
- Bragg, W. H. (1910). The consequence of the corpuscular hypothesis of the gamma and x-rays, and the range of beta rays. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(117), 385–416.
- Bragg, W. H. (1912). On the direct or indirect nature of the ionization by x-rays. *Philosophical Magazine*, 23(136), 647.
- Bunge, H. J. (1965). Zur darstellung allgemeiner texturen. *Zeitschrift fuer Metallkunde*, 56, 872–874.
- Bunge, H. J. (1982). *Texture analysis in materials science: mathematical methods*. Butterworths.
- Burgin, M. (2015). *Theory of knowledge: structures and processes*. World Scientific.
- C141-E006F XRD-7000. (t.t.). Shimadzu. Diakses pada 1 Mei 2021 dari <https://www.ssi.shimadzu.com/sites/ssi.shimadzu.com/files/Products/literature/xray/C141-E006F.pdf>

- Calculating angle between 2 planes. (t.t.). Matter. Diakses pada 7 Mei 2021, dari [www4.hcmut.edu.vn/~huynhqlinh/project/Minhhoa3/Nhieuza/Nx2/www.matter.org.uk/diffraction/electron/calculating\\_angle\\_between\\_2\\_planes.htm](http://www4.hcmut.edu.vn/~huynhqlinh/project/Minhhoa3/Nhieuza/Nx2/www.matter.org.uk/diffraction/electron/calculating_angle_between_2_planes.htm)
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (10th ed.). Wiley.
- Ching-Her, D. (2019, 23 Maret). Circle of sphere and its applications. Diakses pada 19 September 2021 dari <http://www.chday169.url.tw/SphericalCircle.htm>
- Closest packed structures - chemistry libretexts. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/States\\_of\\_Matter/Properties\\_of\\_Solids/Crystal\\_Lattice/Closest\\_Pack\\_Structures](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Solids/Crystal_Lattice/Closest_Pack_Structures)
- Composite propellers: Turboprop engine aircraft. (t.t.). Hartzell Propeller. Diakses pada 30 April 2021 dari <https://hartzellprop.com/products/propeller-systems/composite-propellers-turboprop-engine-aircraft/>
- Dahms, M., & Bunge, H. J. (1988). A positivity method for the determination of complete orientation distribution functions. *Textures and Microstructures*, 10, 21–35.
- Dahms, M., & Bunge, H. J. (1989). The iterative series-expansion method for quantitative texture analysis. I. general outline. *Journal of Applied Crystallography*, 22, 439–447.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill Companies.
- Dynam 13" x 6" - Carbon fiber two blade prop PRO.1306. (t.t.). Diakses pada 30 April, 2021, dari <https://www.monkeyhobby.com/dynam-13-x-6-carbon-fiber-two-blade-propeller-pro-e1306/>
- Einhorn, J. R., Steiner, M. A., Vogel, S. C., Garlea, E., & Agnew, S. R. (2017). Crystallographic texture of straight-rolled alpha-uranium foils via neutron and x-ray diffraction. *Journal of Applied Crystallography*, 50, 859–865.
- Electron backscatter diffraction (EBSD) | Scanning electron microscopy of nitrides. (t.t.). University of Strathclyde. Diakses pada 2 Mei 2021 dari <https://gan-sem.phys.strath.ac.uk/techniques/electron-backscatter-diffraction-esbd/>
- Elliott, J. C. (1994). *Structure and chemistry of the apatites and other calcium orthophosphates* (1st ed., Vol. 18). Elsevier Science.

- Engler, O., & An, Y. (2005). Correlation of texture and plastic anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005. *Solid State Phenomena*, 105, 277–283.
- Engler, O., & Randle, V. (2009). *Introduction to texture analysis*. CRC Press.
- Eschner, T., & Fundenberger, J. J. (1997). Application of anisotropic texture components. *Textures and Microstructures*, 28, 181–195.
- Faris, S. T. (2015). Analysis of plane strain rolling rigid plastic materials using finite element method. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 08(02), 99–15
- File: Atomic orbitals spdf m-eigenstates and superpositions.png. (t.t.). Wikimedia Commons. Diakses pada 18 Mei 2021 dari [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atomic\\_orbitals\\_spdf\\_m-eigenstates\\_and\\_superpositions.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atomic_orbitals_spdf_m-eigenstates_and_superpositions.png)
- Fowler, B. (2001). *Uncovering the life and times of a prehistoric man found in an alpine glacier*. The University of Chicago Press.
- Friedrich, W., Knipping, P., & von Laue, M. (1912). *Interferenz-erscheinungen bei roentgenstrahlen*. Verlag der Koeniglich-Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Fullerene science module. (t.t.). Department of Chemistry - Washington University in St. Louis. [www.chemistry.wustl.edu/~edudev/Fullerene/solid-state.html](http://www.chemistry.wustl.edu/~edudev/Fullerene/solid-state.html)
- Garret, R. H., & Grisham, C. M. (2017). *Biochemistry* (6th ed.). Cengage Learning.
- Glusker, J. P., Lewis, M., & Rossi, M. (1995). Crystal structure analysis for chemists and biologists. *Journal of Chemical Education*, 72(3), A73–79.
- Groups: Fill in this table for cubic structures. (t.t.). Slide Player. Diakses pada 15 Mei 2021 dari <https://slideplayer.com/slide/13553512>
- Height of hcp unit cell. (t.t.). Mathematics Stack Exchange. Diakses pada 29 April 2021 dari <https://math.stackexchange.com/questions/2204090/height-of-hcp-unit-cell>
- Helming, K. (1996). *Texturapproximation durch modellkomponenten (in German)* [Tesis]. Technical University Clausthal. Cuvillier Verlag.
- Helming, K., & Eschner, T. (1990). A new approach to texture analysis of multiphase materials using a texture component model. *Crystal Research and Technology*, 25, K203–K208.

- Helming, K., Schwarzer, R. A., Rauschenbach, B., Geier, S., Leiss, B., Wenk, H. R., Ullemeyer, K., & Heinitz, J. (1994). Texture estimates by means of components. *Zeitschrift fuer Metallkunde*, 85, 545–553.
- Hexagonal close-packed (HCP) unit cell—materials science & engineering. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://msestudent.com/hexagonal-close-packed-hcp-unit-cell/>
- Hirsch, J., & Luecke, K. (1988). Description and presentation methods for textures. *Textures and Microstructures*, 8–9, 131–151.
- Huang, J. J., Kuo, H. -C., & Shen, S. C. (2013). *Nitride semiconductor light-emitting diodes (LEDs): Materials, technologies and applications*. Woodhead Publishing.
- Inaba, K., Kobayashi, S., Uehara, K., Okada, A., Reddy, S. L., & Endo, T. (2013). High resolution x-ray diffraction analyses of (La,Sr)MnO<sub>3</sub>/ZnO/sapphire(0001) double heteroepitaxial films. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 3, 72–89.
- Kestens, L. (t.t.). *Introduction to quantitative texture analysis*. PMT USP. Department of Metallurgical and Materials Engineering - Polytechnic School of the University of Sao Paulo. [pmt.usp.br/pagina%20no%20site%20do%20departamento/pdf/Quantitative%20Texture%20Analysis.pdf](http://pmt.usp.br/pagina%20no%20site%20do%20departamento/pdf/Quantitative%20Texture%20Analysis.pdf)
- Inverse Pole Figure. (t.t.). Oxford Instruments. [www.ebsd.com/popup/inversepolefigure.htm](http://www.ebsd.com/popup/inversepolefigure.htm)
- Jackson, A. G. (1991). *Handbook of crystallography* (Vol. 1). Springer.
- Jiao, H., Xu, Y., Xu, H., Zhang, Y., Xiong, W., Misra, R. D., Cao, G., Li, J., & Jiang, J. (2018). Influence of hot deformation on texture and magnetic properties of strip cast non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 462, 205–215.
- Jones, G. (2021, 15 April). *Direct metal laser sintering (DMLS) - Simply explained*. All3DP. (t.t.). <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained>
- Juntunen, P., Karjalainen, P., Raabe, D., Bolle, G., & Kopio, T. (2001). Optimizing continuous annealing of interstitial-free steels for improving deep drawability. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 1989–1995.
- Karlon, W. J., Hsu, P. P., Li, S., Chien, S., McCulloch, A. D., & Omens, J. H. (1999). Measurement of orientation and distribution of cellular alignment and cytoskeletal organization. *Annals of Biomedical Engineering*, 27(6), 712–720.

- Kelly, A., & Knowles, K. M. (2020). *Crystallography and crystal defects* (3rd ed.). Wiley.
- Kikuchi pattern. (t.t.). JEOL. [https://www.jeol.co.jp/en/words/emterms/search\\_result.html?keyword=kikuchi%20pattern](https://www.jeol.co.jp/en/words/emterms/search_result.html?keyword=kikuchi%20pattern)
- Klein, C., & Dutrow, B. (2007). *Manual of mineral science* (23rd ed.). Wiley.
- Klosek, V. (2017). Crystallographic textures. *EPJ Web of Conferences*, 155, 00005.
- Kocks, U. F. (1988). A symmetric set of Euler angles and oblique orientation space sections. Dalam J. S. Kallend, & G. Gottstein (Eda.), *Proceedings of the 8th International Conference on Texture of Materials (ICOTOM)* (31–36). Metallurgical Society.
- Korda, A. A., Muda, I., & Soepriyanto, S. (2014). Tekstur deformasi dan rekristalisasi baja lembaran canai dingin bebas interstisi. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 15(2), 57–66.
- L6: The orientation distribution, definition, discrete forms, examples - ppt video online download. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://slideplayer.com/slide/5352589/>
- Langer, R., & Vacanti, J. P. (1993). Tissue engineering. *Science*, 260(5110), 920–926.
- Lee, C. (2013, 1 Juni). Doing crystal diffraction without the crystals. *Ars Technica*. <https://arstechnica.com/science/2013/05/foamy-x-rays-see-inside-rare-molecules/>
- Liu, J. L., & Bashir, S. (2015). *Advanced nanomaterials and their applications in renewable energy* (1st ed.). Elsevier Science.
- Lohmuller, P., Peltier, L., Hazotte, A., Zollinger, J., Laheurte, P., & Fleury, E. (2018). Variations of the elastic properties of the CoCrFeMnNi high entropy alloy deformed by groove cold rolling. *Materials*, 11, 1337.
- Luecke, K., Pospiech, J., Jura, J., & Hirsch, J. (1986). On the presentation of orientation distribution functions by model functions. *Zeitschrift fuer Metallkunde*, 77, 312–321.
- Luecke, K., Pospiech, J., Virnich, K. H., & Jura, J. (1981). On the problem of the reproduction of the true orientation distribution from pole figures. *Acta Metallurgica*, 29(1), 167–185.
- March, J. (1992). *Advanced organic chemistry: Reactions, mechanism, and structures* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.

- Marquez, J. P. (2006). Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions. *International Journal of Solids and Structures*, 43(21), 6413–6423.
- Mason, J. K., & Schuh, C. A. (2009). Expressing crystallographic textures through the orientation distribution function: Conversion between generalized spherical harmonic and hyperspherical harmonic expansions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 2590–2602.
- Masterton, W. L., & Hurley, C. N. (2015). *Chemistry: Principles and reactions* (8th ed.). Cengage Learning.
- Materials science and engineering (t.t.). PennState College of Earth and Mineral Sciences. <https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2094>
- Matthies, S. (1982). Form effects in the description of the orientation distribution function of texturized materials by model components. *Physica Status Solidi (b)*, 112, 705–716.
- Meyers, R. (Ed.). (2001). *Encyclopedia of physical science and technology*. Academic Press.
- Michigan wheel 32 inch DynaQuad 4 blade bronze. (t.t.). Propeller Depot. Diakses pada 30 April 2021 dari <https://www.propellerdepot.com/32-dynaquad-4-blade-bronze>
- Mondal, C., Singh, A. K., Mukhopadhyay, A. K., & Chattopadhyay, K. (2013). Effect of different modes of hot cross-rolling in 7010 aluminum alloy: Part II. Mechanical properties anisotropy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44A, 2764–2777
- Mooney, D. J., & Mikos, A. G. (1999). Growing new organs. *Scientific American*, 280(4), 60–65.
- Muiruri, A., Maringa, M., & du Preez, W. (2020). Crystallographic texture analysis of as-built and heat-treated Ti6Al4V (ELI) produced by direct metal laser sintering. *Crystals*, 10(8), 699.
- Munekawa, S. (1990). *Goniometer in an x-ray diffraction device* (Nomor Paten US4972448A). United States of America.
- Nakano, T., Kaibara, K., Ishimoto, T., Tabata, Y., & Umakoshi, Y. (2012). Biological apatite (BAp) crystallographic orientation and texture as a new index for assessing the microstructure and function of bone regenerated by tissue engineering. *Bone*, 51 (4), 741–747.
- Niedrig, H. (1978). Physical background of electron backscattering. *Scanning*, 1, 17–34.

- Odegard, G. M., Gates, T. S., Wise, K. E., Park, C., & Siochi, E. J. (2003). Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites. *Composite Science and Technology*, 63(11), 1671–1687.
- Orientation Distribution Function (ODF) - ppt video online download. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://slideplayer.com/slide/4124735/>
- Patrick, C. W., Mikos, A. G., & McIntire, L. V. (Eds.). (1998). *Frontiers in Tissue Engineering* (1st ed.). Pergamon.
- Pramono, A. W. (2001). *Quantitative analysis of the thermomechanical properties of Cu-18wt%Nb in-situ metal matrix composite wire and the Cahn-Hilliard simulation of its thermal phase evolution*. Shaker-Verlag.
- Pramono, A. W. (2003). Makrotekstur dari fasa tembaga dan fasa niobium pada komposit in-situ Cu-18%Nb sebagai coran dan kawat. *Majalah Jurinal Fisika Indonesia*, A4(0206), 1–7.
- Pramono, A. W. (2013). Preliminary observation on macro texture of Nb<sub>3</sub>Sn low temperature superconductor (LTS). *Advanced Materials Research*, 789, 193–197.
- Premium mango - each. (t.t.). Target. Diakses pada 30 April 2021 dari <https://www.target.com/p/premium-mango-each/-/A-15026728>
- Priyanto, T. H., & Li, M. J. (2015). Analisis tekstur zircaloy-4 menggunakan metode william-imhof-mathies-vinel (WIMV). *Urania*, 21(1), 19–28.
- Priyanto, T. H., Bharoto, & Ramadhani, A. (2015). Penentuan basal-poles pada zircaloy-4 menggunakan kombinasi pole figure dan metode proyeksi stereografi. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 16(2), 91–96.
- Protter, M. H. (1948). Generalized spherical harmonics. *Transactions of the American Mathematical Society*, 63, 314–341.
- Purcek, G., Saray, O., Nagimov, M. I., Nazarov, A. A., Safarov, I. M., & Danilenko, V. N. (2012). Microstructure and mechanical behavior of UFG copper processed by ECAP following different processing regimes. *Philosophical Magazine*, 92(6), 690–704.
- QUANTAX EBSD Detector e-FlashFS. (t.t.). Azo Nano. Diakses pada 2 Mei 2021 <https://www.azonano.com/equipment-details.aspx?EquipID=1347>
- Quncheng, F., & Jiachen, K. (2018). A new method of accurate drawing stereographic projection for cubic system: the plane geometry method. *Material Sciences*, 8(8), 871–877.

- Raabe, D. (1995a). Microstructure and crystallographic texture of strip-cast and hot-rolled austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 26A(4), 991–998.
- Raabe, D. (1995b). Textures of strip cast and hot rolled ferritic and austenitic stainless steel. *Materials Science and Technology*, 11(5), 461–468.
- Raabe, D. (1996). On the influence of the chromium content on the evolution of rolling textures in ferritic stainless steels. *Journal of Materials Science*, 31, 3839–3845.
- Raabe, D. (1997). Texture and microstructure evolution during cold rolling of a strip cast and of a hot rolled austenitic stainless steel. *Acta Materialia*, 45 (3), 1137–1151.
- Raabe, D. (2003). Overview on Basic Types of Hot Rolling Textures of Steels. *Steel Research*, 74 (5), 327–337.
- Raabe, D., Hoelscher, M., Dubke, M., Pfeifer, H., Hanke, H., & Luecke, K. (1993). Texture development of strip cast ferritic stainless steels. *Steel Research*, 64, 359–363.
- Raabe, D., Hoelscher, M., Dubke, M., Reher, F., & Luecke, K. (1994). Texture development of strip cast ferritic stainless steel. *Materials Science Forum*, 157–162, 1039–1044.
- Raabe, D., Reher, F., Hoelscher, M., & Luecke, K. (1993). Textures of strip cast Fe16%Cr. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 29(1), 113–116.
- Raffi, M., Mehrwan, S., Bhatti, T. M., Akhter, J. I., Hameed, A., Yawar, W., & ul Hasan, M. M. (2010). Investigations into the antibacterial behavior of copper nanoparticles against Escherichia coli. *Annals of Microbiology*, 60, 75–80.
- Raghuvanshi, M. (2015). Influence of grain boundary chemistry on the properties of CIGS photovoltaic cells. *Materials*. University of Rouen.
- Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 2(2), 65–71.
- Rinaldi, R., Artioli, G., Kockelmann, W., Kirfel, A., & Siano, S. (2002). The contribution of neutron scattering to cultural heritage research. *Notiziario Neutroni e Luce di Sincrotrone*, 7, 30–37.
- Rodrigues, O. (1840). Des lois geometriques qui regissent les deplacements d'un systeme solide dans l'espace, et de la variation des coordonnees provenant de ces deplacements consideres independamment des causes qui peuvent les produire. *Journal de Mathematiques Pures et Appliquees*, 380–440.

- Roe, R. J. (1965). Description of crystallite orientation in polycrystalline materials. III. general solution to pole figure inversion. *Journal of Applied Physics*, 36(6), 2024–2031.
- Sander, D., Tian, Z., & Kirschner, J. (2008). Cantilever measurements of surface stress, surface reconstruction, film stress and magneto elastic stress of monolayers. *Sensors*, 8, 4466–4486.
- Sasaki, N., Matsushima, N., Ikawa, T., Yamamura, H., & Fukuda, A. (1989). Orientation of bone mineral and its role in the anisotropic mechanical properties of bone--transverse anisotropy. *Journal of Biomechanics*, 22 (2), 157–164.
- Schoenfliess, A. (1891). *Kristallsysteme und kristallstruktur*. Druck und Verlag von B. G. Teubner.
- Schoenfliess, A. (1923). *Theorie der kristallstruktur*. Verlag von Gebrueder Borntraeger.
- Schwartz, A. J., Kumar, M., Adams, B. L., & Field, D. P. (Eds.). (2009). *Electron backscatter diffraction in materials science*. Springer-Verlag.
- Sddefault.jpg (640x480). (t.t.). [Gambar]. Diakses pada 7 Mei 2021 dari <https://i.ytimg.com/vi/LDunw3cZsaw/sddefault.jpg>
- Silver three blade knife. (t.t.). [Gambar]. Diakses pada 30 April 2021 dari <https://dekkade.com/en/bladed-weapons/259-silver-three-blade-knife.html>
- Smith, W. F. (1996). *Principles of materials science and engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Soboyejo, W. O. (2003). *Mechanical properties of engineered materials*. New York: Marcel Dekker.
- Solidification of material. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://www.slideshare.net/RakeshSingh125/solidification-of-material>
- Souza, F. M., Plaut, R. L., de Lima, N. B., & Fernandes, R. D. (2012). Recrystallization and crystallographic texture in AA4006 aluminum alloy sheets produced by twin roll caster and direct chill processes. *Revista Escola de Minas*, 65(3), 363–370.
- Squires, L., & Hartmann, T. (2015). *Progress report on development of texture measuring technique via XRD*. Idaho National Laboratory.
- Stereographic projection crystallography. (t.t.). [slide presentasi] Diakses pada 4 Mei 2021 dari <https://www.slideshare.net/ShivamJain77/stereographic-projection-crystallography>

- Nelson, S. A. (2014, 23 September). Stereographic projection of crystal faces. Tulane University. Diakses pada 7 Mei 2021 dari [https://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/stereographic\\_projections.htm](https://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/stereographic_projections.htm)
- Stock photo – Brain x-ray image tomography. (t.t.). [Gambar]. Diakses pada 19 September 2021 dari [https://es.123rf.com/photo\\_8125039\\_tomografia%C3%ADa-de-imagen-de-rayos-x-del-cerebro-.html](https://es.123rf.com/photo_8125039_tomografia%C3%ADa-de-imagen-de-rayos-x-del-cerebro-.html)
- Stoica, G. M., Dessieux, L. L., Stoica, A. D., Vogel, S. C., Muralidharan, G., Radhakrishnan, B., Gorti, S. B., An, K., Ma, D., & Wang, X. (2018). Distinct recrystallization pathways in a cold-rolled Al-2%Mg alloy evidenced by in-situ neutron diffraction. *Quantum Beam Science*, 2(3), 17.
- Symmetry in crystallography. (t.t.). Department of Chemistry & Biochemistry Chemical Crystallography Laboratory. Diakses pada 7 Mei 2021 dari [xrayweb.chem.ou.edu/notes/symmetry.html](http://xrayweb.chem.ou.edu/notes/symmetry.html)
- Tang, W., Liu, Z., Liu, S., Zhou, L., Mao, P., Guo, H., & Sheng, X. (2020). Deformation mechanism of fine grained of Mg-7Gd-5Y-1.2Nd-0.5Zr alloy under high temperature and high strain rates. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(4), 1144–1153.
- Terzano, R., Denecke, M.A., Falkenberg, G., Miller, B., Paterson, D., & Janssens, K. (2019). Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by x-ray based techniques (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 91(6), 1029–1063
- Texture components and euler angles: Part 1, June 2007. (t.t.). [Slide presentasi]. Diakses pada 9 Mei 2021 dari <https://slideplayer.com/slide/4124749>
- The Laue method. (t.t.). Matter. Diakses pada 7 Juli 2021 dari [www4.hcmut.edu.vn/~huynhqlinh/project/Minhhoa3/Nhieuxa/Nx2/www.matter.org.uk/diffraction/x-ray/laue\\_method.htm](http://www4.hcmut.edu.vn/~huynhqlinh/project/Minhhoa3/Nhieuxa/Nx2/www.matter.org.uk/diffraction/x-ray/laue_method.htm)
- The Wulff net. (t.t.). DoITPoMS University of Cambridge. Diakses pada 7 Mei 2021 dari <https://www.doitpoms.ac.uk/tplib/stereographic/wulff.php>
- Vector polygon mesh planet radiating, lines and dots internationalization globalization 3D. (t.t.). 123RF. Diakses pada 4 Mei 2021 dari [https://www.123rf.com/photo\\_62118965\\_stock-vector-vector-polygon-mesh-planet-radiating-lines-and-dots-internationalization-globalization-3d.html](https://www.123rf.com/photo_62118965_stock-vector-vector-polygon-mesh-planet-radiating-lines-and-dots-internationalization-globalization-3d.html)
- Waesemann, N. (2012). *Structural transformations in complex perovskite-type relaxor and relaxor-based ferroelectrics at high pressures and temperatures* [Disertasi]. Fachbereich Geowissenschaften der Universitaet Hamburg.

- Wassermann, G., & Grewen, J. (1962). *Texturen metallischer Werkstoffe*. Springer-Verlag.
- Wentzel, G. (1926). Zwei bemerkungen ueber die zerstreuung korpuskularen strahlen als beugungserscheinung. *Zeischrift fuer Physik*, 40, 590–593.
- What is Solidification – Javatpoint. (t.t.). Diakses pada 19 September 2021 dari <https://www.javatpoint.com/what-is-solidification>
- Wright, S., Nowell, M. M., & Field, D. P. (2011). A review of strain analysis using electron backscatter diffraction. *Microscopy and Microanalysis*, 17(3), 316–329.
- Zeng, Z., Stanford, N., Davies, C. H., Nie, J. F., & Birbilis, N. (2018). Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects. *International Materials Reviews*, 64(2), 1–36.
- Zheng, Z., Balint, D. S., & Dunne, F. P. (2016). Rate sensitivity in discrete dislocation plasticity in hexagonal close-packed crystals. *Acta Materialia*, 107, 17–26.
- Ziv, V., Wagner, H. D., & Weiner, S. (1996). Microstructure-microhardness relations in parallel-fibered and lamellar bone. *Bone*, 18(5), 417–428.

# Indeks

- Additive manufacturing, 96, 97, 143  
Akademisi, 4, 116  
Alumida, 97  
Aluminium, 13, 84, 90, 97  
Anil, 90, 91, 93, 94, 109  
Anisotropic properties, 3  
Apatit biologis, 105  
APF, 11, 12, 13  
Arah canai, 54, 58  
Arah kristalografi, 3, 25, 27, 28, 29, 30, 44, 49  
Arah melintang, 54  
Arah rol, 54  
Arah slip, 11, 13, 16  
As-cast, 55  
ATEX, 38  
Atom, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 31, 32, 33, 35, 37  
Atomic packing factor, 11  
Atom kristal, 31  
Austenit, 109  
Austenitik, 111, 112  
Axio Vision SE6E, 98  
A ZEISS Axio Scope A1, 98  
Back-reflection laue, 34  
Backscattered electron, 35  
Baja, 58, 86, 88, 108, 109, 110, 111, 112, 113  
Baja dupleks, 110  
Baja karbon rendah, 109, 111, 112  
Baja karbon rendah feritik bebas interstisi, 109

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- Baja listrik, 86  
 Baja rol panas, 108, 109, 110  
 Baja silikon, 109, 112  
 Baja tahan karat, 58  
 Baja tahan karat austenitik, 110,  
     112, 113  
 Baja tahan karat feritik paduan  
     tinggi, 109  
 Baja tahan karat strip casting, 112  
 Bands, 39  
 Basal, 17  
 Basic fibroblast growth factor, 106  
 Basketweave, 98, 99  
 Batas butir, 2, 3, 8, 10, 90  
 Batas butir sudut besar, 8  
 Batas butir sudut kecil, 8  
 B (Brass), 57  
 BCC, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 69,  
     86, 108  
 Belahan bola atas, 45  
 Belahan bola utara, 45  
 Benda rol, 75, 76  
 Berilium, 15  
 Berkas elektron, 5, 31, 33, 35, 62,  
     79, 116  
 Berkas neutron, 5, 31, 33, 46, 96,  
     115  
 Berkas sinar-x, 34  
 Berotasi, 10  
 Bertranslasi, 10  
 Besi, 12  
 bFGF, 106, 107, 108  
 Bidang basal, 14, 15, 16, 26, 32  
 Bidang-c, 26  
 Bidang cermin, 16  
 Bidang ekuator, 45, 46  
 Bidang kristalografi, 13, 21, 22, 23,  
     24, 25, 26, 27, 31, 44, 48,  
     49, 50, 53  
 Bidang-m, 26  
 Bidang prisma, 15, 26  
 Bidang pyramidal, 15  
 Bidang-r, 26  
 Bidang slip, 11, 13, 16  
 Bilangan koordinasi, 11, 12  
 Bilangan kuantum, 78  
 Bilangan terbesar, 27, 29  
 BMD, 105  
 Body-centered cubic, 3  
 Bola imajiner, 44, 45, 46, 47  
 Bone mineral density, 105  
 Bragg, 31, 34, 39  
 Bragg's Law, 31  
 Brass texture component, 56  
 Bravais lattices, 17  
 Butir, 2, 3, 5, 8, 10, 81, 90, 92, 94,  
     100  
 Butiran, 8, 10, 92, 93, 99, 100, 103  
 Butiran kolumnar, 99  
 Cacat, 4  
 Cairan, 7  
 Canai/rol austenitik, 109  
 Canai/rol feritik, 109  
 Cb (Cube), 57  
 center pole, 46, 54  
 CF, 17  
 Close packed planes, 13  
 Coarse Bi-Phase, 99  
 Computer Generated Images, 82  
 Constructive Interference, 31

- Continuous Casting, 109  
Contour levels, 53  
Controlled heating, 98  
Coran, 55, 96  
Crystallographic point groups, 51  
CT-scan, 83  
Cu, 3, 4, 13, 55, 56, 57, 83  
CuT, 57  
DC, 90, 91, 92, 93, 95  
Deep-drawing, 90  
Deformasi, 3, 5, 10, 13, 15, 74  
Degrees of freedom, 68  
Dendrit, 112  
Derajat kebebasan, 68  
Derajat keteraturan atom-atom, 11  
Derajat regenerasi tulang, 105  
Deret, 77, 81, 84  
Desctructive interference, 31  
Detektor, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 116  
DFT, 80  
Diagram kutub logaritmik, 36  
Diffraction pattern, 31  
Difraksi, 31, 32, 44  
Difraksi dinamis, 39  
Difraksi sinar-x, 31  
Difraktogram, 55  
Difraktometer, 37, 96, 106, 116  
Dillamore, 64  
Direct chill, 90  
Direct metal laser sintering, 96  
Dislokasi, 13, 90  
Disordered, 8  
Distribusi orientasi, 67, 80  
Distribusi ternormalisasi, 75  
DMLS, 96, 97, 98  
DO3, 109  
Domain frekuensi, 81  
Ductile, 12  
EBSD, 5, 39, 40, 64, 65, 90, 98, 99, 116  
Ekspansi termal, 2  
Ekuivalen simetris, 60  
Elastic scattering, 31  
Electron backscatter diffraction, 39  
Electron beam, 33  
Elektron, 2, 31, 33, 35, 36, 37, 39, 77, 78, 116  
Elektron di kulit atom, 2  
Elemen pemandu, 109  
Elemen simetri, 15, 74, 77  
Elips, 35  
Emas, 13, 36, 37  
Energi bebas gibbs, 8  
Energi deformasi yang disimpan, 109  
Energi kinetik, 31  
Energi salah susun, 109  
Entalpi pembentukan, 2  
Epitaksial, 99  
Equiaxed, 100, 112  
Ernest Rutherford, 36  
Euler angles, 59, 68  
Euler angles and space, 5  
Euler space, 68  
Evolusi tekstur, 56, 86, 108  
Evolusi tekstur rol panas, 108  
Expansion tensor, 33  
Exponent Connect, 38

- Face-centered cubic, 3  
 Faktor persekutuan terkecil, 23, 27, 29  
 Faktor pertumbuhan fibroblast dasar, 106  
 Faktor schmid, 3  
 Fasa, 2, 7, 8, 10, 33, 39, 78, 90, 99, 100, 102, 103, 104, 105  
 Fasa cair, 7  
 Fasa kedua, 2  
 Fasa padat, 8  
 Fasa terner, 90  
 FCC, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 57, 58, 69, 108  
 FDO, 3, 5, 36, 75, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 108, 116  
 Feritik, 109, 110, 112, 113  
 Fiber, 86  
 Five-circle lateral XRD goniometer, 37  
 Fluida, 7  
 Fourier transform, 33, 80  
 FPK, 23, 27, 29  
 Freezing, 8  
 Fungsi distribusi orientasi, 3  
 Fungsi sinusoidal, 81  
 Furnace cooling, 98  
 Gangguan destruktif, 31  
 Gangguan konstruktif, 31  
 Garis cacat, 39  
 Garis difraksi, 44  
 Garis ekses, 39  
 Garis-garis kikuchi, 39  
 Gas, 7, 31  
 G/B (Goss/Brass), 57  
 Gelombang elektromagnetik, xvii, 31  
 Generalized spherical harmonic, 78  
 Generalized spherical harmonics, 77, 84  
 G (Goss), 57  
 Ghost error, 84, 85  
 Gibbs free energy, 8  
 Globulitis, 112  
 Goniometer, 36, 37, 38, 55, 61, 79, 84, 90, 116  
 Goniometer XRD lateral, 37, 38, 90  
 Goniometer XRD lateral lima-ling-karan, 37  
 Goniometer XRD vertikal, 37  
 Grain boundaries, 8  
 Grain boundary angle, 8  
 Grains, 8, 10  
 Green compact, 55  
 G. Wentzel, 36  
 Hamburan, 31, 35  
 Hamburan elastis, 31  
 Hamburan sekunder, 33  
 HCP, 3, 11, 14, 15, 16, 17, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 67, 69, 70  
 Heksagonal, 17, 76  
 Hexagonal closed-pack, 3  
 Hidrogel gelatin, 106  
 High angle grain boundary, 8  
 HIP, 96  
 HKL channel 5, 98  
 Homogen, 110, 112

- Hot isostatic pressing, 96  
 Hukum Bragg, 31  
 Hyperspherical harmonic expansions, 77  
 Identity operation, 18  
 Ikatan antar atom, 8  
 Ikatan atom, 7  
 Ikatan ion, 8  
 Ikatan kovalen, 8  
 Ikatan logam, 8  
 Ikatan Van der Waals, 8  
 ILL, 96  
 Implan tulang, 97, 142  
 Improper rotation, 16, 21, 50, 52  
 Indeks miller, 21, 25, 57, 60  
 Indeks miller-bravais, 25, 28, 30  
 Inelastis, 39  
 Inherited textures, 109  
 Inklusii, 2  
 In-plane, 4  
 In-service behavior, 3  
 Institut Laue-Langevin, 96  
 Intensitas tekstur, 53, 102  
 Intermetalik, 109  
 Interplanar spacing, 31, 32  
 Interstitial free, 109  
 Inti, 8, 33, 35  
 Inverse pole figure, 60, 64, 89  
 Inversi, 20  
 Inversion center, 16  
 IPF, 3, 67, 77, 86, 89, 92, 100, 116  
 Isochronous, 90  
 Iso-intensity, 80  
 Isometrik, 44, 45  
 Itrium, 15  
 Jalan penghubung, 39  
 Jarak antar bidang, 31, 32  
 Jarak antar bidang atom, 34  
 Jaring Wulff, 48, 49, 50, 51  
 Jarum, 18, 21, 49, 50, 58, 99, 100, 103  
 Jasa pengujian, 4  
 Jumlah atom efektif per sel satuan, 16  
 Jumlah sistem slip, 16  
 Kaidah tangan kanan, 21, 26, 74  
 Kaleng, 90  
 Kalsium, 13  
 Kapak tembaga pra-sejarah, 96  
 Karakterisasi serbuk, 96  
 Karbon, 36, 37  
 Kc, 68, 69, 70  
 Keasaman, 2  
 Kebalikan, 22, 23, 25, 27, 29  
 Kebasaan, 2  
 Kegagalan material, 4, 142  
 Kekerasan, 2, 90, 93, 95  
 Kekerasan mikro, 93  
 Kekuatan, 2, 4  
 Kelompok bidang, 23, 50, 52  
 Kelompok bidang slip, 11  
 Kelompok titik kristalografi, 50, 51  
 Kepadatan mineral tulang, 105  
 Kepadatan probabilitas, 75, 80, 84  
 Kerangka referensi, 53, 54  
 Kerucut imajiner, 34  
 Kesalahan pemotongan, 84  
 Ketahanan korosi, 2

- Ketangguhan, 2  
Ketebalan sedang, 112  
Ketidakteraturan, 8  
Kikuchi, 39, 40  
Kikuchi pattern, 39  
Kisi-kisi Bravais, 17  
Kobalt, 15  
Kolagen fibril, 106  
Koloni, 100, 103  
Komponen, 4, 55, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 67, 75, 77, 80, 81, 84, 86, 87, 90, 91, 93, 96, 97, 115, 116  
Komponen logam, 97  
Komponen tekstur, 56, 57, 59, 64, 84, 86, 90, 116  
Komponen tekstur berkarakter serat, 86  
Komponen tekstur Cube (Cb), 58  
Komponen tekstur kuningan, 56  
Komponen tekstur taylor, 56  
Komposisi material, 2  
Kondensasi, 7  
Kondisi pengecoran, 109  
Konduktivitas listrik, 2  
Konduktivitas termal, 2  
Konservasi, iv  
konvensi ruang vektor Rodrigues, 77  
Kristal, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 40, 44, 45, 46, 48, 50, 51, 54, 55, 57, 60, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 74, 76, 77, 82, 92, 93, 103, 106, 115, 116  
Kristalinitas, 10, 33  
Kristal tunggal, 3, 4, 8, 34, 40  
Kromium, 12  
Kuantitatif, 105, 108  
Kubik, 17, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 46, 48, 60, 61, 62, 63, 67, 69, 74, 76, 77, 86  
Kubus pusat muka, 3, 11, 12, 13, 14, 57  
Kubus pusat ruang, 3, 11, 12  
Kuningan, 58, 83  
Kurva hiperbola, 34  
Kutub, 36, 37, 39, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 57, 58, 60, 63, 67, 79  
Kutub 001, 46  
Kutub pusat, 46  
Laboratorium IPEN-SP, 90  
Laju regangan, 3, 4, 5  
Lattice parameters, 11, 55  
Layar fosfor, 39  
Lingkaran besar, 45  
Lingkaran kecil, 45, 47  
Lipat-n, 18  
Listrik, 7, 31, 86, 88  
Low angle grain boundary, 8  
Magnesium, 15  
Mahasiswa, 5, 143, 145  
Makrotekstur, 3, 36, 53, 54, 64, 73, 116  
Mangan, 12  
Manufaktur, 4, 96, 115  
Martensit, 98, 100, 112  
Massa jenis, 2  
Material, 2, 3, 5, 8, 10, 33, 34, 35, 43, 55, 56, 57, 58, 60, 75,

- 78, 79, 86, 87, 96, 97, 115,  
142
- Material polikristal, 8
- Matriks orientasi, 68
- MAUD, 38
- MaZda, 38
- Medan gravitasi, 7
- Mekanisme kembaran, 15
- Mekanisme slip, 13, 15
- Metalurgi, 4, 7, 115, 142, 144
- Metalurgi fisik, 5, 142
- Metode kuadrat terkecil non-linier,  
37
- Metode Laue, 34, 35
- Metode Laue pantulan balik, 35
- Metode Laue transmisi, 35
- Metode quasi-Monte-Carlo, 64, 65
- Metode Rietveld, 37
- M.H. Protter, 77
- Mid-layer, 112
- Mikrometer, 7, 99
- Mikroskop optik, 5, 90, 95, 98
- Mikrotekstur, 3, 39, 64, 116
- Mikrotekstur, 3, 39
- Mirror plane, 16
- Misorientasi, 3, 8, 10
- Mobilitas, 7, 13, 94
- Modulus elastisitas, 3
- Modulus Young, 3, 4
- Molekul, 1, 7, 11, 97, 106
- Molibdenum, 10, 12
- Monoklinik, 17, 76
- Mulur, 2
- Nanometer, 7
- ND, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 62, 63,
- 67, 68, 70, 71, 86, 110, 111,  
112, 113, 116
- Neutron beam, 33
- Ni, 13
- Nikel, 13
- Nilai-r, 4
- Nills Tryggve A Baak, 36
- Niobium, 12
- Nomenklatur, 7
- Nomor paten US3322948A, 36
- Nomor paten US4972448A, 36
- Non-linear least square method, 38
- Normal direction, 54
- Normalized distribution, 75
- Northern hemisphere, 45
- Notasi kocks, 73
- Notasi laue, 76
- Notasi roe, 73
- Nucleus, 8
- Nukleasi, 92, 93, 94
- ODF, 3, 5, 10, 75
- OIM, 90, 92, 93, 94, 95, 98, 99,  
100, 101, 104, 116
- Operasi identitas, 18
- Operasi matematika, 80
- Operasi simetri, 15
- Ordered, 8
- Orientasi, 3, 4, 5, 8, 10, 34, 53, 54,  
55, 56, 58, 59, 60, 61, 62,  
64, 67, 68, 70, 73, 74, 75,  
77, 79, 80, 81, 82, 84, 87,  
89, 92, 93, 96, 100, 103,  
106, 108, 109, 112, 115, 116
- Orientasi kristal, 3, 54, 60, 67, 80,  
82

- Orientasi kristalografi, 3, 103  
Orientasi pilihan, 56  
Orientation distribution function, 3, 5, 10, 75  
Orientation image microscopy, 90, 98, 100, 116  
Orientation mapping, 3  
Origin, 22, 24, 27, 29  
Ortonormal, 69, 70, 74  
Ortorombik, 17, 76  
Otomotif, 4  
  
Padatan, 7, 55  
Paduan tinggi, 112  
Panas pembakaran, 2  
Panjang gelombang sinar-x, 31  
Panjang rusuk, 32  
Panjang satuan, 21, 25, 27, 29  
Pantulan bragg, 39  
Pantulan orde rendah, 39  
Parameter kisi-kisi, 11, 14  
Parameter sel, 17  
Partikel, 7, 31, 92, 93  
PAT, 90  
Peaks broadening, 84  
Pelaku industri, xvii, 4  
Pelebaran puncak, 84  
Pemadatan, 10  
Pemanasan, 98  
Pembekuan, 8  
Pembentukan logam, 3, 96  
Pemetaan misorientasi, 3, 5  
Pemetaan orientasi, 3  
Pemodelan gauss dan lorentz, 56  
Pemrosesan, 2, 3, 4, 88, 109, 115  
Pemrosesan material, 115  
  
Pendidikan tinggi, 116  
Pendinginan pada tungku, 98  
Peneliti, 4, 116, 142, 144  
Pengenalan ilmu dan teknik material, 5  
Pengerasan kerja, 4  
Pengotor, 109  
Penjumlahan infinitesimal, 81  
Perak, 13, 58  
Perekayasa, 4, 116  
Performa material, 2, 115, 116  
Pergerakan semu, 15  
Perilaku saat penggunaan, 3  
Perilaku transformasi, 109  
Periodik, 10, 33, 77  
Perlakuan lempeng, 109  
Perlakuan panas, 3, 90, 96, 98, 99, 102, 103  
Perlakuan termomekanik, 3  
Perubahan identitas, 2  
PF, 3, 67, 77, 78, 79, 80, 84, 86, 89, 90, 91, 92, 96, 97, 98, 102, 103, 105, 106, 107, 116  
Pisau tiga mata, 19  
Pita, 39  
Pita difraksi elektron, 39  
Pita Kikuchi, 41  
Pita-pita geser, 109  
Plane strain, 74, 75  
Pola ABABAB, 14  
Pola ABCABC, 13  
Pola difraksi, 31, 33, 39, 44, 45, 46  
Pola hamburan elektron, 39  
Pola Kikuchi, 39  
Pole figure, 53, 54, 56, 57, 58, 59,

- 60, 61, 63, 64, 65, 79, 89,  
 92, 100, 106  
 Poles, 39, 51, 57, 60, 63, 67  
 Polikristalin, 3  
 Porositas, 2, 96, 97  
 Posisi atom, 16  
 Positive ghosts, 84  
 Potensi coulumb, 36  
 Pra-canai, 109  
 Pra-rol, 109  
 Pre-rolling, 109  
 Presipitasi, 90  
 Presipitat, 2, 92, 93  
 Prisma, 17  
 Probability density, 75  
 Produksi massal, 97  
 Profil laju regangan makroskopik,  
     109  
 Propeler dua bilah, 18  
 Propeler empat bilah, 19  
 Propeler enam bilah, 20  
 Proper rotation, 16, 21, 50, 52  
 Proton, 35  
 Prototipe, 97  
 Proyeksi stereografik, 5, 45, 46, 47,  
     53  
 Proyeksi stereografi, 35  
 Puncak-puncak utama xrd, 55  
 Puntir, 74  
 Pusat inversi, 16  
 Pyramidal, 17  
 QMC, 64  
 Radiasi, 34  
 Rantai hidro-karbon, 2  
 RD, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 63, 67,  
     68, 70, 71, 74, 86, 116  
 Reaktor nuklir, 33  
 Reciprocal, 22, 25, 27, 29  
 Referensi kristal, 67  
 Rekayasa jaringan, 105  
 Rekonstruksi, 106, 108  
 Rekrystalisasi, 58, 90, 92, 93, 94  
 Retak, 2  
 Rietveld, 37  
 Robert H Simmons, 36  
 Rolling direction, 54  
 Rombohedral, 17  
 Rotasi, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 50,  
     51, 52, 70, 71, 79, 80, 86  
 Rotasi lipat-1, 18  
 Rotasi lipat-2, 18  
 Rotasi lipat-3, 19  
 Rotasi lipat-4, 19  
 Rotasi lipat-6, 20  
 Rotasi tepat, 18, 20  
 Rotasi tidak tepat, 16, 20, 21, 50,  
     51, 52  
 Rotation axis, 16  
 Roto-inversion, 16, 20, 21, 50, 52  
 Ruang Euler, 5, 73, 74, 77, 78, 79,  
     80, 82, 83, 84  
 Scanning electron microscope, 39,  
     90, 98, 116  
 Secondary scattering, 33  
 Segitiga perwakilan, 63  
 Segitiga stereografik, 60  
 Selective laser sintering, 97  
 Sel satuan, 11, 12, 13, 14, 22, 24,  
     28, 29, 44, 45, 48, 61, 62

- Sem, 35, 39, 42, 90, 98, 116  
Semi equiaxed, 100  
Seng, 15  
Seni, 96  
Serbuk nilon, 97  
Series, 81  
Shear, 15, 74, 76, 91, 93  
Shear bands, 109  
Shigeru Munekawa, 36  
Sifat anisotropik, 4  
Sifat fisik, 2, 3  
Sifat kimiawi, 2  
Sifat korosif, 2  
Sifat material, 2, 3, 77, 115  
Sifat mekanik, 2  
Silikon, 40, 90  
Simbolisasi rotasi, 20  
Simetri kristal, 15, 50, 76  
Simetri laue, 17  
Simetri rotasi, 86  
Simetris, 10, 15, 60  
Simulasi monte carlo, 80  
Sinar katoda, 31  
Sinar-X, 5, 31, 32, 33, 34, 36, 43, 46, 61, 106, 107, 115  
Single crystal, 8  
Sinter, 99, 103  
Sir William Henry Bragg, 31  
Sistem koordinat Cartesian, 21, 22  
Sistem kristal, 51, 60, 69  
Sistem kubik, 11, 12  
Sistem referensi spesimen, 67, 68  
Sistem slip, 11, 13, 15, 16  
Sistem slip aktif, 109  
Skema reduksi, 109  
Slab treatment, 109  
Slip direction, 11  
Slip plane, 11  
SLS, 97  
Solidifikasi, 3, 8, 10  
Solutes, 90  
Spot difraksi, 39  
Stacking fault energy, 109  
Stationary, 36  
Stereogram, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 61, 63  
Strip casting, 112, 113  
Stronium, 13  
Struktur atom, 2  
Struktur kristal, 2, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 21, 25, 26, 28, 55, 74, 97  
Struktur kristal hexagonal close packed, 25, 28  
Struktur Kristal Logam, 10, 11  
Struktur material, 1, 115  
Struktur mikro, 3, 64, 78, 79, 93, 98, 99, 105, 109, 110, 112  
Sudut batas butir, 8  
Sudut Bragg, 34  
Sudut datang, 31, 32  
Sudut datang sinar-X, 31  
Sudut dihedral, 48, 49  
Sudut kemiringan, 8  
Sudut-sudut Euler, 57, 60, 67, 68, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77  
Sumbu koordinat spesimen, 54  
Sumbu positif, 25  
Sumbu rotasi, 16  
Sumbu spesimen, 61, 62

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- Sumbu-sumbu sel satuan, 61  
Sumbu-sumbu spesimen, 61, 62  
Susunan berulang, 10, 13  
Symmetry operation, 15
- Talyor texture component, 56  
Tegangan friksi, 12  
Tegangan sisa, 96  
Teknik material, 2, 115, 142  
Tekstur, 2, 3, 4, 5, 10, 16, 33, 35, 37, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 67, 75, 77, 78, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 93, 96, 97, 98, 103, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116  
Tekstur B, 58  
Tekstur Brass, 58, 59  
Tekstur Cb, 57  
Tekstur Cube, 57, 58, 91, 93  
Tekstur G, 58  
Tekstur Goss, 58, 59  
Tekstur kristalografi, 2, 3, 4, 5, 10, 16, 33, 36, 37, 53, 55, 57, 59, 67, 75, 78, 89, 90, 93, 96, 97, 98, 102, 108, 109, 110, 115, 116  
Tekstur minor, 84  
Tekstur plane-strain, 110  
Tekstur shear, 110  
TEM, 10  
Tembaga, 3, 4, 13, 55, 56, 64, 83, 96, 97  
Tensor pemuaian, 33  
Tetragonal, 17, 76  
Texture component, 55, 58, 59
- Thin strip casting, 109  
Through-thickness, 113  
Tilt angle, 8  
Timbal, 33  
Tingkatan kontur, 53  
Tingkat kerapatan atom, 11, 12  
Titanium, 15, 143  
Titik lebur, 2, 97  
Titik O, 22  
Titik perpotongan, 21, 22, 23, 25  
Toksisitas, 2  
Torsi, 74  
Transformasi, 15, 33, 67, 68, 69, 80, 82, 98  
Transformasi Fourier, 81, 82  
Transisi fasa, 109  
Translasi, 15  
Transmission Laue, 35  
Transverse direction, 54  
TRC, 90, 91, 92, 93, 94, 95  
Trigonal, 17, 76  
Triklinik, 17, 76  
Truncation error, 84, 85  
Tulang kortikal, 106, 107  
Tungku QUIMIS, 90  
Tungsten, 12  
Twin roll caster, 90
- UFG, 64  
Uji merusak, 96  
Ulet, 12  
Ulna, 106, 107  
Ultra-fine grained, 64  
Unit cell, 11, 44  
Unit length, 21, 25

- Uranium, 53, 54
- Vanadium, 12
- Vektor kristalografi, 27, 28, 29
- Vibrating particles, 7
- Visco-plastic-self-consistent, 3
- VPSC, 3
- W, 12, 30, 67, 142
- Waktu perendaman, 109
- Waktu rekristalisasi, 109
- Widmanstätten, 98
- Wilayah infinitesimal, 80
- Wilhelm Konrad Röntgen, 31
- Wolfram, 12
- Work hardening, 4
- Wulff net, 48
- XRD, 35, 36, 37, 38, 55, 90, 116
- XRD goniometer, 35
- XRD peaks, 55
- Yield strength, 4
- Zirkonium, 15

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Biografi Penulis



### Andika Widya Pramono

Lahir di Jakarta pada 13 Maret 1970. Ia menamatkan pendidikan dasar di SD Negeri Kebon Baru 05 Pagi, Gudang Peluru, Tebet, Jakarta Selatan, pada 1982; pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 3, Manggarai, Jakarta Selatan, pada 1985; serta pendidikan menengah atas di SMA Negeri 8, Bukit Duri, Tebet, Jakarta Selatan, pada 1988. Pada 1989, ia mendapatkan beasiswa Science and Technology Manpower Development Program (STM-DP) 1 dari pemerintah Indonesia untuk melanjutkan studi ke Wayne State University, Detroit, Amerika Serikat, dan memperoleh gelar B.Sc

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pada 1992 dan M.Sc pada 1993 di bidang *materials science and engineering*.

Selama kuliah di Amerika Serikat, dia beberapa kali mendapat penghargaan untuk prestasi akademik, seperti Dean of Engineering's Honor List, Tau Beta Pi Engineering Honor Society member, Golden Key National Engineering Honor Society Member, dan Climax Metal Scholarship. Setelah lulus S-2, dia pulang ke Tanah Air untuk mulai bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian dan Pengembangan Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P3M LIPI) dari 1994 sampai 1995. Hingga pada awal 1996, ia memperoleh beasiswa DAAD untuk sekolah bahasa Jerman di Goethe Institut, Bremen; dan studi doktoral ke RWTH Aachen University sampai mendapat gelar Dr.-Ing pada 2000 di bidang teknik material. Pengalaman struktural meliputi (1) Kepala Bidang Metalurgi Fisik dan Manufaktur Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) LIPI (2006–2008), (2) Kepala Bidang Konservasi Bahan Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) LIPI (2008–2010), serta Kepala Pusat Penelitian Metalurgi dan Material (P2MM) LIPI (2010–2019).

Sejak 2008 hingga 2010, Dr. Andika W. Pramono ditunjuk sebagai Koordinator Subkegiatan Kompetitif LIPI bidang material maju dan nanoteknologi. Beberapa pelatihan teknis dan kepemimpinan juga sempat diikuti, termasuk Diklat Kepemimpinan Tingkat II pada 2016 di Lembaga Administrasi Negara Jakarta, dan dia memperoleh predikat peserta terbaik di kelas angkatannya. Pada 14 Mei 2020, Dr. Andika W. Pramono dianugerahi gelar Profesor Riset dari LIPI untuk rekam jejak (publikasi, paten, serta kegiatan dan kolaborasi litbang) dan keahlian di bidang material untuk alat kesehatan yang mencakup (1) material biokompatibel untuk implan tulang, serta (2) material superkonduktor untuk alat kesehatan *magnetic resonance imaging* (MRI). Sejak 2002, Dr. Andika W. Pramono juga membantu mengajar di Institut Teknologi PLN Jakarta untuk mata kuliah metalurgi fisik, material teknik, analisis kegagalan material, kajian umur sisa material, teknik pengolahan bahan, bahasa Indonesia untuk penelitian, serta metodologi penelitian. Dia juga membantu mengajar mata kuliah dan praktikum karakterisasi mineral dan logam di Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung. Pembimbingan tugas akhir dan skripsi, tesis, serta disertasi juga dilaku-

kan untuk mahasiswa dari Institut Teknologi Bandung, Universitas Indonesia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Universitas Sumatera Utara, serta Institut Teknologi PLN Jakarta. Dr. Andika W. Pramono juga aktif mengajar pada pendidikan dan pelatihan jabatan fungsional peneliti di Pusbindiklat LIPI untuk mata diklat tim efektif, manajemen litbang, pengorganisasian penelitian, serta pembimbingan penulisan proposal penelitian dan karya tulis ilmiah.

Dr. Andika W. Pramono juga aktif sebagai anggota Himpunan Peneliti Indonesia (Himpindo), Materials Research Society Indonesia (MRS Ina), serta Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia. Kolaborasi riset luar negeri yang pernah dilakukan adalah dengan Institut für Metallkunde und Metalphysik RWTH Aachen University, Jerman; Gießerei Institut RWTH Aachen University, Jerman; Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie RWTH Aachen University, Jerman; Max Planck Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Jerman; University of Zagreb, Kroasia; National Academy of Sciences, Belarus; Tohoku University, Jepang; Kyoto University, Jepang; Osaka University, Jepang; Yeungnam University, Korea Selatan; serta National High Magnetic Field Laboratory Florida State University, Amerika Serikat. Mitra industri/swasta untuk kerja sama litbang dalam negeri antara lain PT Timah (Persero) Tbk, PT Phapros Tbk, dan Indonesia Toray Science Foundation (ITSF).

Untuk riset material implan di dalam negeri, Dr. Andika W. Pramono juga berkolaborasi dengan Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, Fakultas Kedokteran Universitas Padjadjaran, Fakultas Kedokteran Universitas Pelita Harapan, Divisi Orthopedi Rumah Sakit Pusat Pertamina Jakarta, serta Perhimpunan Ahli Bedah Orthopedi dan Traumatologi Ikatan Dokter Indonesia. Topik riset yang sekarang sedang dilakukan oleh Dr. Andika W. Pramono adalah (1) pengembangan klip aneurisma dari paduan titanium dengan teknik *metal forming* dan *additive manufacturing* serta (2) superkonduktor suhu tinggi berbasis logam tanah jarang untuk aplikasi medis dan energi.



## Jenny Bouffette

Lahir di Bandung pada 18 Maret 1960, ia besar di Jakarta sejak 1961 sampai 1986. Dia menamatkan pendidikan di SD Negeri Menteng 02 Pagi, Jakarta, pada 1972; SMP Negeri 9 Jakarta pada 1975; SMA Negeri 4 Jakarta pada 1979; serta lulus S-1 dari Departemen Teknik Metalurgi FTUI pada 1984. Atas beasiswa World Bank pada 1986,

Jenny Bouffette berangkat ke Prancis untuk mengikuti kursus di CLARIF Lille dan melanjutkan S-1 dengan spesialisasi di bidang mekanik, bersamaan dengan tingkat M.Sc, di Ecole National d'Ingénieur Tarbes (ENIT) di Perancis. Pada 1987, dia kembali ke Indonesia dan bekerja sebagai peneliti pada bidang korosi di Lembaga Metalurgi Nasional (LMN) LIPI Bandung serta magang pada bagian layanan jasa di IPTN Bandung. Pada 1988, dia kembali ke Prancis atas beasiswa dari pemerintah Perancis tanpa kontrak untuk meneruskan tingkat Ecole-Prépa di Ecole de Chimie di Toulouse, dan tingkat DEA (S-2) di Universitas Lille pada 1989. Jenny Bouffette juga pernah bekerja sebagai asisten dosen metalurgi di Ecole Centrale de Lille pada 1991, sambil kuliah malam di CNAM Lille untuk bidang bahasa Inggris.

Pada Juli 1992, dia berhasil menyelesaikan program S-3 dalam bidang *materials science* dengan topik “Mechanical Behavior of Galvanized Steel ILZRO” dengan predikat *very honorable distinction*. Pada Agustus 1992, Jenny Bouffette kembali ke Indonesia untuk bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian dan Pengembangan Metalurgi (P3M) LIPI di Puspiptek, Serpong. Pada 1993, dia kembali ke Perancis bersama keluarga, dan pada 1994 berhasil lulus ujian negara untuk menjadi dosen tetap di ENI Tarbes. Beberapa mata kuliah yang diampu, yaitu (1) *materials chemistry*, (2) *atomistic chemistry*, (3) *electrochemistry of materials*, (4) *physical metallurgy*, (5) *heat treatment*, (6) *superficial heat*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

*treatment, (7) surface treatment coating technology, (8) mechanical metallurgy, (9) mechanical deformation, (10) selection of materials, (11) quality control, dan (12) relations between structure and mechanical properties.*

Selain mengajar, Jenny Bouffette aktif sebagai anggota di kegiatan-kegiatan universitas, seperti juri ujian masuk sarjana S-1, komite teknik, komite hubungan international/pertukaran mahasiswa, komite perpustakaan, ketua praktikum metalurgi di ENIT, serta aktif di asosiasi kemasyarakatan di kampus ENI. Pengalaman di luar bidang pengajaran meliputi (1) lulusan tingkat konservatorium pada bidang piano klasik dari Sekolah Yayasan Pendidikan Musik (YPM) di Jakarta pada 1984, (2) *co-director* di perusahaan BMJ Technologies milik suami pada 1996–2014, (3) pianis di grup paduan suara di Kota Aureilhan pada 2004–2008, serta (4) mahasiswi di Universitas UTB Tarbes pada bidang sinematografi dan filsafat pada 2016.

Selain itu, sejak 2016, dia menjadi presiden Yayasan AAI (Association Les Amis de l'Indonésie), yang didirikan pada 1999, dengan misi: (1) membantu anak-anak Indonesia untuk melanjutkan sekolah, (2) memperkenalkan kultur Indonesia di Perancis Selatan, serta (3) bekerja sama dengan KBRI Paris dan KJRI Marseille serta Asosiasi Pelajar Indonesia di Toulouse (PPI). Sejak 2021, Jenny Bouffette menjalani studi secara daring di bidang *project management* di CNAM. Kegemaran/hobi antara lain musik (piano, vokal, orkestra, paduan suara, konser, dan festival), *cultural visits*, berkuda, *kendo*, *kobudo*, *taikido*, dan *travelling*. Jenny Bouffette pernah memperoleh dua penghargaan tertinggi dalam bidang pendidikan yang diberikan oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Perancis, yaitu Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques pada 2012 serta Officier dans l'Ordre des Palmes Académiques pada 2020.

# PENGANTAR TEKSTUR KRISTALOGRAFI: TEORI DAN APLIKASI

Analisis dan kajian tekstur kristalografi diperlukan untuk mengetahui serta memahami anisotropi sifat suatu senyawa, material, produk, atau komponen sebagai hasil dari tahapan proses, manufaktur, atau sintesis. Bidang ilmu yang membutuhkan investigasi tekstur kristalografi tidak hanya terbatas pada bidang ilmu metalurgi dan material, tetapi bisa juga pada bidang lainnya, seperti bidang hayati, bahkan sosial kemasyarakatan.

Buku ini bertujuan memberi pemahaman secara efektif dan efisien kepada pembaca tentang tekstur kristalografi beserta aplikasinya serta menjadi pedoman tentang sistematika berpikir dalam mengkaji dan menganalisis problematika tekstur kristalografi. Selain itu, di dalam buku ini juga terdapat beberapa contoh aplikasi tekstur kristalografi di berbagai bidang untuk memberikan gambaran dan *sense* kepada para pembaca sehingga siap untuk mengimplementasikannya di bidang masing-masing.

Pada masa mendatang, pemahaman terhadap investigasi dan analisis tekstur kristalografi serta penggunaannya di bidang penelitian, perekayasaan, dunia pendidikan tinggi, serta industri di Indonesia diharapkan dapat meningkat. Untuk itu, semoga buku ini bermanfaat serta dapat membuka cakrawala baru tentang tekstur kristalografi di Indonesia.

ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan oleh:



LIPPI Press, anggota Ikapi  
Gedung PDDI LIPPI Lt. 6  
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710  
Telp.: (021) 573 3465 | Whatsapp 0812 2228 485  
E-mail: press@mail.lipi.go.id  
Website: lipipress.lipi.go.id | penerbit.lipi.go.id

DOI 10.14203/press.393



ISBN 978-602-496-279-1



9 786024 962791