

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kuningan 70/30

Campuran logam dari tembaga dan seng disebut juga kuningan, yang dapat membentuk kombinasi sifat material yaitu kekuatan dan ketahanan korosi yang tinggi. Diagram kesetimbangan fasanya termasuk jenis *peritektik*. Paduan dengan kadar seng maksimal 35% berfasa tunggal yaitu (α) alfa dengan struktur kristal FCC sehingga kemulurannya tinggi maka kemampuan pengerjaan dinginnya tinggi, diantaranya kuningan 70/30 yang dinamakan juga *cartridge brass* atau *yellow alfa brass*, banyak digunakan di industri strategis, sehingga material kuningan ini tetap penting, selama belum ada penggantinya karena sifat mampu bentuk tarik dalam (*deep drawing*) yang tinggi. Kadar seng diatas 35% terbentuk fasa β (beta) dengan struktur kristal BCC sehingga kekerasan meningkat, paduan ini kemuluran pada saat pengubahan bentuk dingin rendah akan tetapi tinggi kemampuan pengerjaan panasnya karena sifat fasa ini plastisitasnya tinggi pada temperatur tinggi^[7].

Batas kadar seng maksimal 42% semakin tinggi kadar seng tidak dapat digunakan secara komersil karena material bersifat rapuh. Untuk semua fasa tunggal paduan alfa (α), pembekuan paduan dimulai dengan pembentukan *dendrit* di pendinginan dibawah temperatur likuidus (garis AD) menyebabkan struktur *dendrit* terlihat di mikrostruktur setelah pengetsaan. *Dendrit* yang merupakan struktur mikro setelah pengecoran dihancurkan oleh pengerolan panas maupun dingin dan anil menghasilkan kembaran (*twin*) dengan bentuk butir mendekati segienam, untuk yang fasa ganda atau dupleks paduan alfa dan beta (α/β), perilaku pembekuan paduan tergantung dari kadar seng diatas atau di bawah *peritektik*^[7].

Sampai kadar 37,6% atau titik D, alfa berlanjut ke fasa utama, beta akan dibentuk oleh reaksi *peritektik* yang terjadi di cairan logam yang membeku terakhir lihat Gambar 2.1. Diatas seng kadar 37,6% terjadi pembekuan dengan pembentukan *dendrit* beta, pada saat pembekuan lengkap, struktur keseluruhan

terdiri dari fasa beta. Rentang pembekuan dibatasi dengan demikian *dendrit-dendrit* beta hampir homogen. Pada saat pendinginan beta mempertahankan sedikit tembaga, yang ditandai oleh kemiringan dari batas fasa $(\alpha+\beta)/\beta$ atau garis CH. Pada temperatur 770°C alfa mulai berpisah dari beta, dan jumlahnya meningkat ketika temperatur menurun. Reaksi ini dikendalikan oleh difusi dan bisa dihambat dengan pendinginan cepat. Alfa diendapkan pada batas kristal dan kristalografi bidang arah tertentu (bidang *oktahedral*) dari fasa induk. Pemisahan bentuk ini di dalam kristal dinamakan struktur *Widmanstätten*^[7].

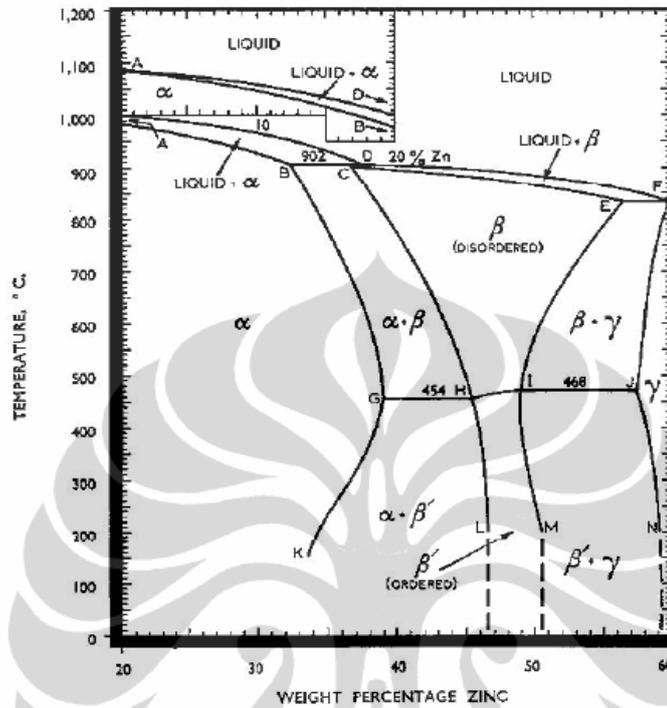
Selain seng penambahan sedikit unsur lain (kurang dari 5%) digunakan untuk memodifikasi sifatnya sehingga menghasilkan material yang lebih tepat untuk aplikasi tertentu misalnya sebagai bahan baku industri pertahanan dengan unsur seperti besi untuk menghaluskan butir, unsur nikel untuk menghaluskan butir dan meningkatkan ketahanan korosi, unsur aluminium untuk memperbaiki keenceran cairan logam pada saat pengecoran, semakin besar kadarnya dapat memicu terjadinya fasa beta (β) yang keras karena penambahan 1% aluminium setara dengan 6% seng lihat Gambar 2.1.^[7]

Tabel 2.1. Keterangan titik-titik di dalam diagram fasa kuningan^[7].

Point	A	B	C	D	E	F	G
°C	1083	902	902	902	834	834	454
Zn (%wt)	0	32,5	36,8	37,6	56,5	60,0	39,0
Point	H	I	J	K	L	M	N
°C	454	468	468	150	200	200	200
Zn (%wt)	45,5	48,9	57,5	33,6	46,6	50,6	59,1

Penambahan unsur seng maupun unsur paduan lainnya mempunyai pengaruh yang besar terhadap sifat mekanis dan struktur mikro akhir kuningan, melalui perubahan proporsional dari kehadiran fasa alfa (merupakan fasa yang ulet dengan struktur kristal FCC) , beta (merupakan fasa penguat dengan struktur kristal BCC) dan gamma (struktur kristal BCC merupakan fasa tidak diinginkan atau rapuh) lihat Gambar 2.2.

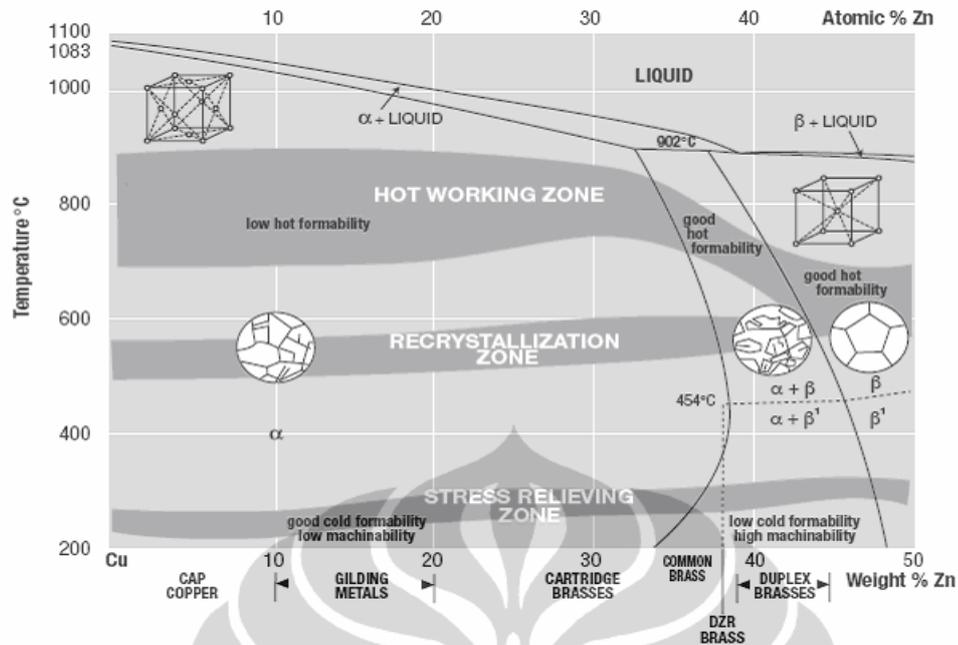
Unsur-unsur paduan lainnya yang biasa ditambahkan ke dalam paduan kuningan, seperti Si, Al, Sn, Mg, Pb, Fe, Mn dan Ni yang berpengaruh terhadap penambahan kadar seng ekuivalen lihat Tabel 2.2^[8-9].



Gambar 2.1. Diagram fasa paduan tembaga dan seng (kuningan)^[7]

Tabel 2.2. Koefisien Ekuivalen Seng *Guillet Dezinfication*^[9].

Unsur	Si	Al	Sn	Mg	Pb	Fe	Mn	Ni
Seng Eq.	10	6	2	2	1	0,9	0,5	-1,3



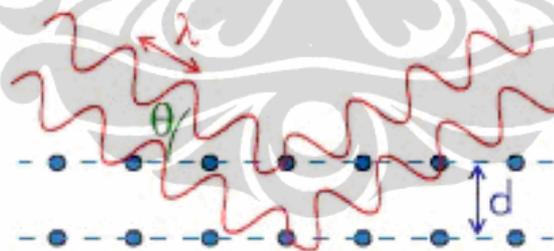
Gambar 2.2. Komposisi seng, struktur kristal, kemampuan bentuk dan temperatur perlakuan panas^[10].

2.2. Difraksi Sinar X

Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum Sinar X memiliki panjang gelombang $10^{-5} - 10^{-8}$ nm, berfrekuensi $10^{17} - 10^{20}$ Hz dan memiliki energi $10^3 - 10^6$ eV. Panjang gelombang Sinar X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. Difraksi Sinar X merupakan teknik yang digunakan dalam karakteristik material untuk mendapatkan informasi tentang ukuran atom dari material kristal maupun nonkristal. Difraksi tergantung pada struktur kristal dan panjang gelombangnya. Jika panjang gelombang jauh lebih dari pada ukuran atom atau konstanta kisi kristal maka tidak akan terjadi peristiwa difraksi karena sinar akan dipantulkan sedangkan jika panjang gelombangnya mendekati atau lebih kecil dari ukuran atom atau kristal maka akan terjadi peristiwa difraksi. Ukuran atom dalam orde angstrom (\AA) maka supaya terjadi peristiwa difraksi maka panjang gelombang dari sinar yang melalui kristal harus dalam orde angstrom (\AA)^[11].

Metode difraksi Sinar X digunakan untuk mengetahui struktur dari lapisan tipis yang terbentuk. Sampel diletakkan pada sampel holder difraktometer Sinar X. Proses difraksi Sinar X dimulai dengan menyalakan difraktometer sehingga diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas Sinar X yang dipantulkan. Untuk difraktometer Sinar X, Sinar X terpancar dari tabung Sinar X. Sinar X didifraksikan dari sampel yang konvergen yang diterima slit dalam posisi simetris dengan respon ke fokus Sinar X. Sinar X ini ditangkap oleh detektor sintilator dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut, setelah dieliminasi komponen *noise*-nya, dihitung sebagai analisa pulsa tinggi. Teknik difraksi Sinar X juga digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama. Analisa difraksi Sinar X berdasarkan interaksi antara berkas cahaya Sinar X yang menumbuk sampel, jika sampel memiliki struktur berurutan, beberapa berkas cahaya Sinar X akan berubah arah pada sudut tersendiri tergantung dari struktur sampel dan panjang gelombang Sinar X lihat Gambar 2.3 dan 2.4^[11].

Sudut difraksi dapat ditentukan dari persamaan hukum Bragg :



Gambar 2.3. Berkas cahaya difraksi sinar menurut hukum Bragg^[11].

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta_{hkl} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : n adalah orde difraksi.

λ adalah panjang gelombang Sinar X.

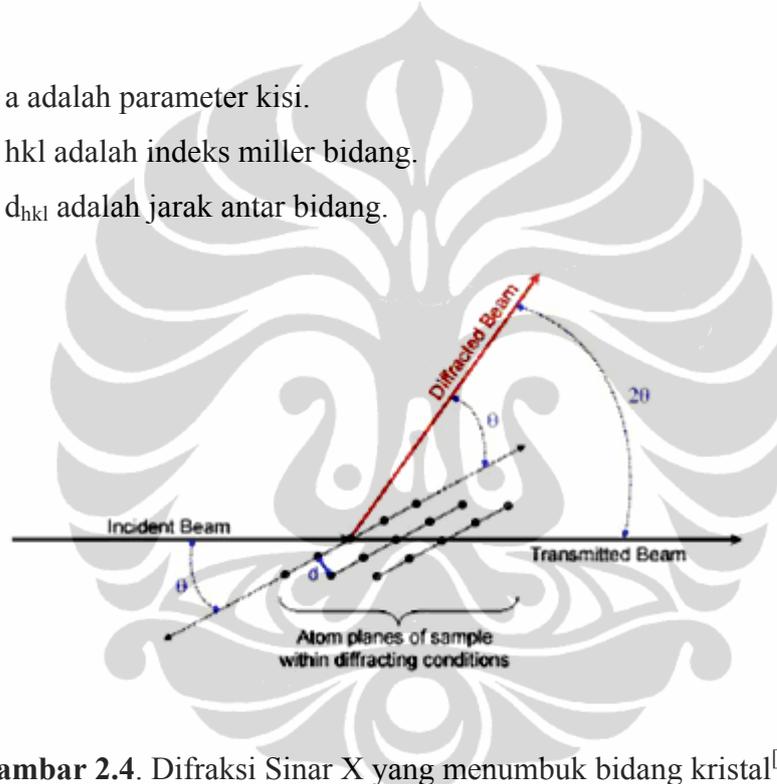
d_{hkl} adalah jarak antar bidang difraksi dengan indeks miller hkl .

θ adalah sudut difraksi Bragg untuk bidang difraksi.

Dari persamaan 2.1. terlihat bahwa jika panjang gelombang Sinar X yang digunakan diketahui dan sudut θ_{hkl} diukur, dimungkinkan untuk menentukan jarak antar bidang difraksi, d_{hkl} . Untuk struktur kubik jarak d bidang difraksi berhubungan dengan parameter kisi struktur kristal dengan persamaan berikut :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \dots\dots\dots (2.2)$$

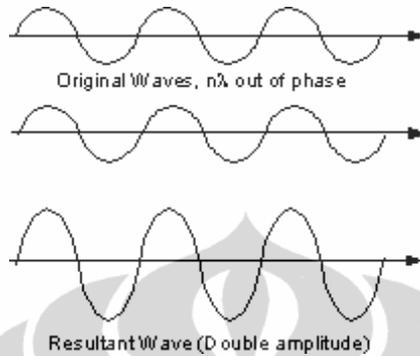
Dimana : a adalah parameter kisi.
 hkl adalah indeks miller bidang.
 d_{hkl} adalah jarak antar bidang.



Gambar 2.4. Difraksi Sinar X yang menumbuk bidang kristal^[12].

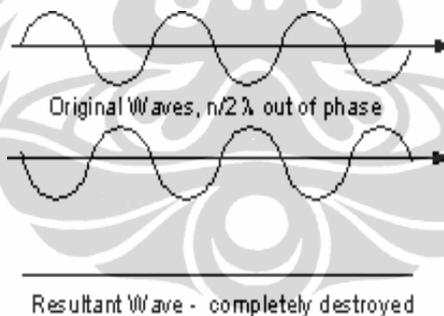
Dalam prakteknya dimungkinkan menentukan struktur kristal sampel dengan memasukan kedalam indeks bidang difraksi yang ada dalam pola difraksi, jika sampel disusun dari berbagai fasa, memungkinkan mengidentifikasi fasa yang ada disampel. Sinar X di didifraksikan oleh kisi kristal untuk mendapatkan pola puncak pantulan pada sudut dan intensitas berbeda, seperti cahaya yang dapat didifraksikan oleh celah dari kisi dengan jarak antar dua garis yang tepat. Berkas cahaya difraksi dari atom berturut-turut di bidang jika tidak dibatalkan mereka adalah fasa. Jika berkas Sinar X terdiri dari ikatan gelombang terpisah, maka gelombang dapat bergabung satu sama lainnya, jika semua ikatan gelombang

dalam satu fasa, puncak mereka itu dan terjadinya melalui posisi yang sama, gelombang akan bergabung satu sama lainnya dan amplitudo mereka akan saling menambahkan menghasilkan gelombang gabungan yang memiliki amplitudo lebih besar (jumlah semua gelombang dalam satu fasa) lihat Gambar 2.5^[12].



Gambar 2.5. Dua gelombang yang saling menguatkan^[12].

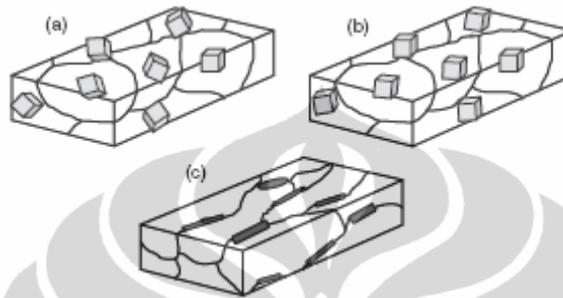
Jika gelombang diluar fasanya kemudian gabungan saling merusak akan terjadi dan amplitudo gelombang akan dikurangi. Dalam keadaan luar biasa, jika gelombang diluar fasa, penggabungan gelombang akan tidak memiliki amplitudo dan kemudian dirusak sepenuhnya lihat Gambar 2.6^[12].



Gambar 2.6. Dua gelombang yang saling menghilangkan^[12].

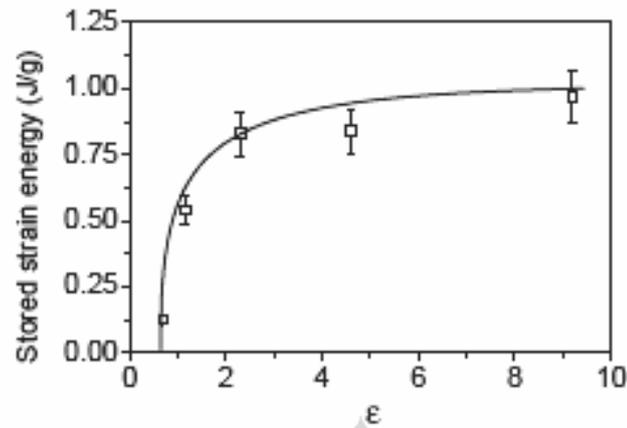
Pada kumpulan polikristal setiap butir adalah sebuah kristal tersendiri, yang berbeda dari butir tetangganya dalam arah kristalnya lihat Gambar 2.7. Pada tahapan proses manufaktur jarang kristal mengarah sepenuhnya kearah tertentu, akan tetapi mengacak, misalnya dalam pengecoran, butir memanjang dapat terbentuk disepanjang arah kristalografi tertentu pada saat pembekuan, kemudian pada saat deformasi plastis, kristal juga berputar menuju arah tertentu yang stabil. Pada rekristalisasi kristal baru juga terbentuk dan tumbuh diluar matriks kristal yang terdeformasi. Semua proses menimbulkan pengembangan arah butir tidak

acak dalam kumpulan polikristal, diketahui sebagai arah tertentu atau tekstur. Jenis tekstur yang dibentuk tergantung dari jenis material, perlakuan panas dan pengerjaan mekanis. Sifat fisika, mekanis bahkan kimia dapat berbeda dengan arah kristalografi atau bidang yang berbeda. Oleh sebab itu tekstur material biasanya menunjukan bersifat anisotropi^[13].

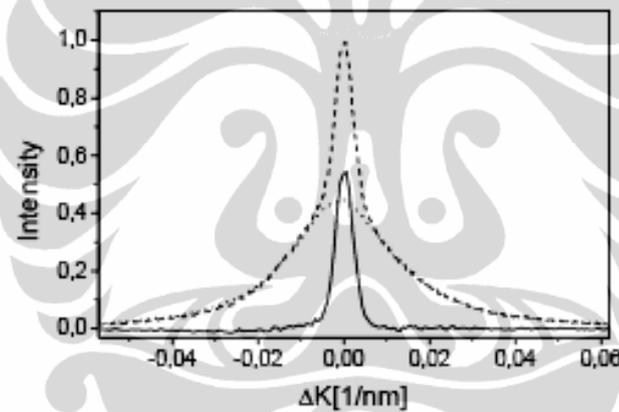


Gambar 2.7. (a). Material tanpa tekstur, (b). Material dengan kristalografi tekstur, (c). Material dengan morfologi tekstur. Bujur sangkar kecil menunjukan arah kristalografi butir^[14].

Tembaga yang dirubah bentuk melalui ekstrusi sampai 8 kali, kemudian setelah struktur mikronya dianalisa dengan Sinar X, ukuran kristal berkurang 10 nanometer bahkan setelah ekstrusi pertama, dan tidak berubah lagi selama dedformasi lebih lanjut. Pada waktu yang bersamaan kerapatan dislokasi meningkat bertahap setelah 4 kali ekstrusi. Kestabilan termal mikrostruktur setelah diamati melalui *differential scanning calorimetry* (DSC), temperatur dari puncak DSC berkurang sedangkan energi tersimpan meningkat dengan meningkatnya regangan lihat Gambar 2.8. Pada awalnya panas dilepaskan menunjukan struktur butir bimodal berkembang, ditandai oleh suatu bentuk puncak ganda khusus dari profil-profil garis difraksi lihat Gambar 2.9^[15].



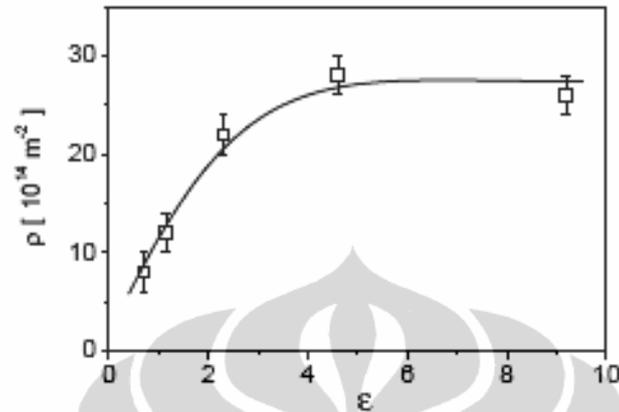
Gambar 2.8. Energi tersimpan yang dilepaskan ketika struktur mikro mengalami recovery dengan fungsi regangan^[15].



Gambar 2.9. Perbedaan diantara puncak (311) untuk tembaga yang diekstrusi 8 kali didinginkan dari temperatur 500°K (garis putus-putus) dan sampel yang tidak dianil (garis titik-titik) memberikan puncak yang tajam (garis penuh)^[15].

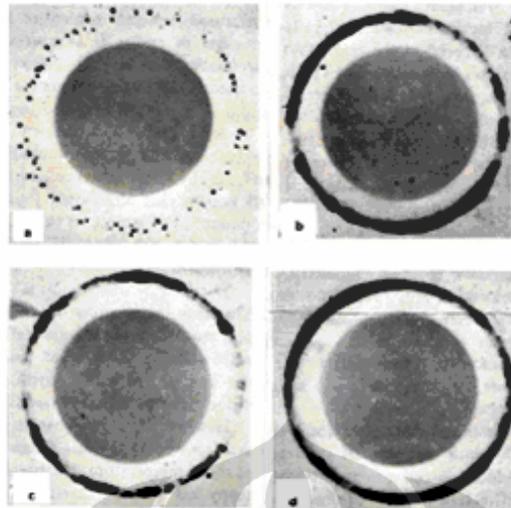
Pada awal panas dilepaskan, struktur butir bimodal terbentuk ditandai oleh suatu bentuk puncak ganda khusus dari profil-profil garis difraksi Sinar X lihat Gambar 2.9. Mikrostruktur sampel tembaga dengan reduksi tinggi yang diamati melalui analisa profil puncak difraksi Sinar X, ternyata ukuran kristal dikurangi sekitar 60 nm bahkan pada regangan 0,7, dan penghalusan lebih lanjut tidak bisa dicapai dengan meningkatkan regangan. Pada waktu yang sama kerapatan dislokasi meningkat dan karakter dislokasi dua kutub menjadi lebih kuat dengan peningkatan regangan sampai 4,6 lihat Gambar 2.10. Perubahan ini didalam

struktur dislokasi menghasilkan pengurangan dari temperatur *recovery*, dan peningkatan di dalam energi tersimpan melepaskan selama anil. *Recovery* mulai dengan pembentukan homogen struktur mikro *bimodal*^[15].



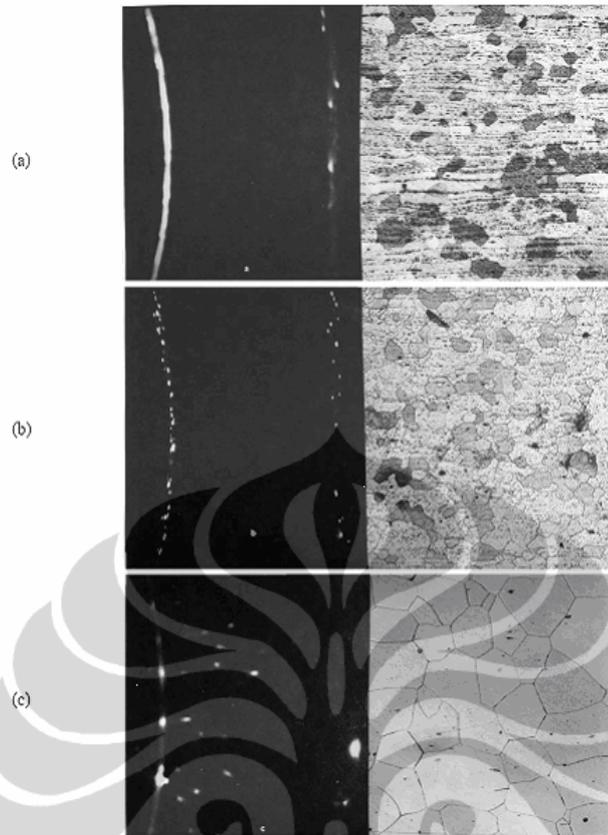
Gambar 2.10. Kerapatan dislokasi dengan fungsi regangan^[15].

Kristal di dalam material yang banyak dipelajari ukurannya tidak lebih besar dari sepuluh mikrometer, kemudian garis difraksi menjadi titik-titik dan informasi tentang ukuran, bentuk, arah dan berbagai cacat-cacat struktur kristal ini dapat diduga dengan mengukur gambaran-gambaran difraksi Sinar X dari kristal, untuk mendapat informasi yang berharga tentang deformasi, proses rekristalisasi yang tidak dapat dicapai oleh metoda-metoda yang lain. Gambaran difraksi Sinar X menguntungkan untuk menggambarkan dan mempelajari deformasi plastis, proses deformasi merubah bentuk kristal menjadi butir, jarum, pelat, pita dll lihat Gambar 2.11^[17].



Gambar 2.11. Pengaruh deformasi pada cincin difraksi ferit bidang (211) melalui pengujian tarik. (a). Deformasi 7%, (b). Deformasi 11%, (c). Deformasi 20%, (d). Gambar dari sistem kamera pemantul kembali, jarak sampel dan film 43 mm, anoda Cr^[17].

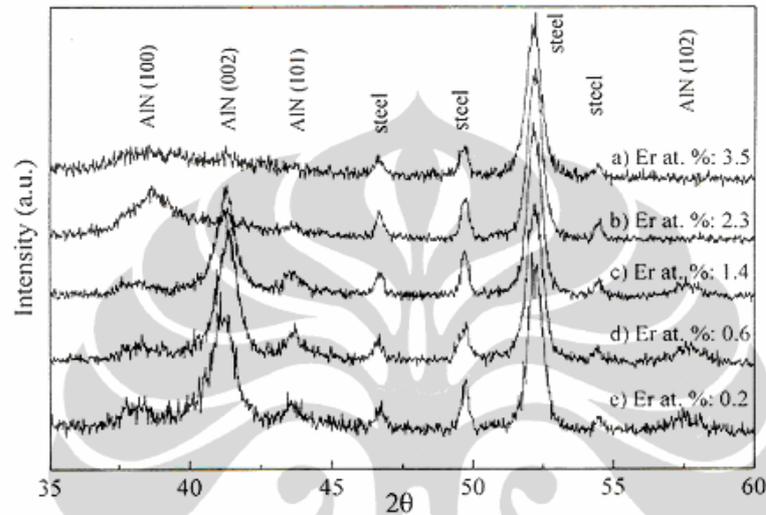
Dari Gambar 2.12 menunjukkan pola difraksi Sinar X dari pelat besi dengan unsur paduan 14% aluminium dan 0,02% carbon dideformasi kemudian dianil selama 15 menit pada temperatur 830°C dan 890°C. Menurut gambar butir setelah anil pada 830°C sepertinya lebih kecil dibanding butir-butir dalam keadaan deformasi. Pola difraksi menunjukkan dengan jelas bahwa yang terlihat digambar pelat yang terdeformasi terdiri atas sejumlah besar regangan kristal-kristal kecil (ukuran ~ 0,1 µm), anil pada temperatur 830°C menyebabkan rekristalisasi dan kristal tumbuh sampai ukuran ~ 50 µm. Jadi gambaran difraksi Sinar X menyediakan bahwa kristal benar-benar tumbuh membesar setelah anil, sesuai dengan yang diharapkan. Setelah anil pada temperatur 890°C pola difraksi menunjukkan bahwa kristal tumbuh bahkan lebih lagi dan mencapai ukuran ratusan mikrometer, sesuai dengan yang diamati melalui mikroskop, walaupun demikian hanya dapat dikenali tahap akhir rekristalisasi, ketika butir tumbuh membesar sampai kesuatu besaran yang menyebabkan kekuatan material menurun. Tahap awal rekristalisasi merupakan hal yang menarik dalam teknologi proses produksi, walaupun jarang dapat dikenali dengan mikroskop, gambaran difraksi Sinar X sangat sensitip terhadap tahap awal rekristalisasi^[17].



Gambar 2.12. Pengaruh rekristalisasi anil terhadap struktur mikro (100x) dan pada segi cincin difraksi ferit (110) dan (200) dari besi tahan panas berdasarkan paduan 14% Cr, 4% Al dan 0,02% C, (a). Tanpa anil, (b). Anil selama 15 menit pada temperatur 830°C, (c). Anil selama 15 menit pada temperatur 890°C, (radiasi Co-K α , kamera Bragg-Bentano semifokus 114,6 mm, sudut timbulnya 30°)^[17].

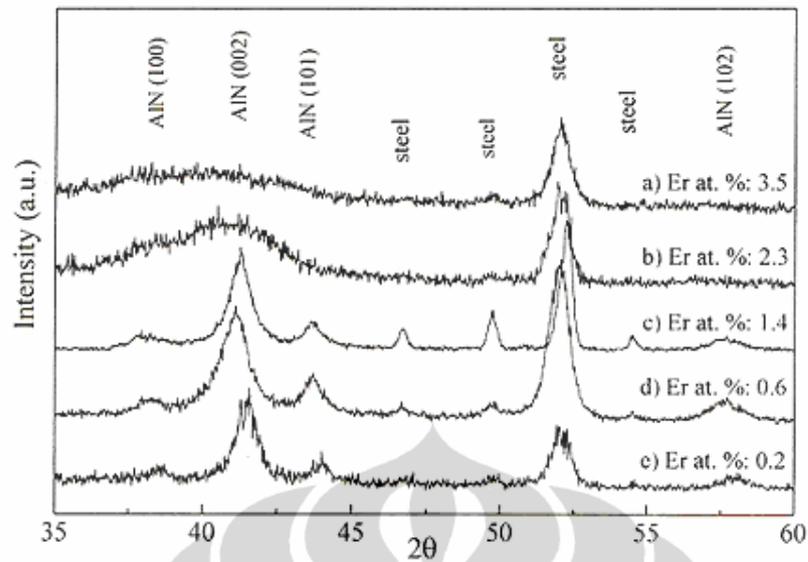
Pola difraksi Sinar X endapan lapisan tipis aluminium nitrida (AlN/Er) pada material dasar M2 sebagai fungsi kadar Er (Erbium) ditunjukkan di Gambar 2.13, tidak termasuk puncak material dasar, untuk konsentrasi Er rendah (spectrum c, d dan e), hanya fitur difraksi yang hadir di gambar difraksi dapat diidentifikasi sebagai fasa AlN. Puncak intensitas AlN menunjukkan bahwa lapisan mempunyai arah khusus. Posisi puncak difraksi Sinar X AlN (002) pada sudut lebih rendah 2θ yaitu $38,81^\circ$ didapatkan dari serbuk AlN menunjukkan bahwa semua lapisan mempunyai tegangan tekan yang tinggi, ketika kadar Er dilapisan dinaikan menjadi 2,3% (spectrum b), puncak difraksi menjadi buruk gambarannya dan puncak melebar, karakteristik struktur kristal dengan ukuran kristal yang sangat rendah, dideteksi untuk sudut difraksi mendekati (100) yang merupakan

posisi standar AlN. Untuk kadar Er tertinggi (spectrum a), bahkan puncak ini melebar hamper menghilang, dengan tidak ada gambaran difraksi yang dapat diamati, menunjukkan bahwa lapisan merupakan material bukan kristal (amorfus). Peningkatan kadar Er dalam lapisan menuju ketidak stabilan mekanis dari kisi kristal AlN dan kepada pembentukan lapisan amorfus pada kadar Er lebih tinggi^[18].



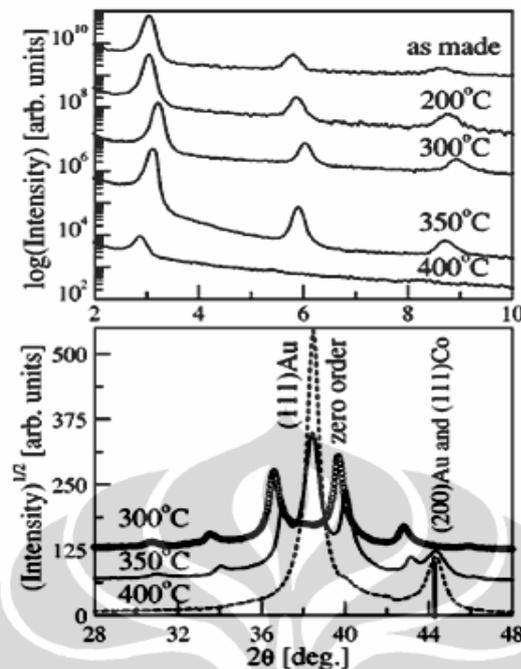
Gambar 2.13. Pola difraksi dari lapisan terhadap kadar Erbium (Er) untuk pengendapan lapisan AlN (Er)^[18].

Pola difraksi Sinar X dari anil lapisan tipis sebagai fungsi kadar Er. Struktur lapisan AlN/Er yang diendapkan dengan kadar Er lebih rendah (spectrum c, d dan e) tidak dipengaruhi oleh anil pada temperatur 875°K selama 1 jam. Sekali lagi tidak termasuk puncak material dasar, hanya gambaran difraksi hadir dalam gambar difraksi sampel ini dapat diidentifikasi sebagai fasa AlN sedangkan arah (002) masih dapat diamati, ditunjukkan di Gambar 2.14. Anil endapan lapisan dengan kadar Er 2,3% (spectrum b) mempromosikan kemunculan tidak terduga puncak difraksi lebar baru yang menimpa gambar difraksi yang diamati sebelum anil. Puncak baru posisinya mendekati posisi standar AlN (002) menunjukkan bahwa proses rekristalisasi telah mulai. Bagaimanapun juga struktur lapisan dengan kadar Er lebih tinggi (spectrum a) tetap amorfus setelah anil^[18].



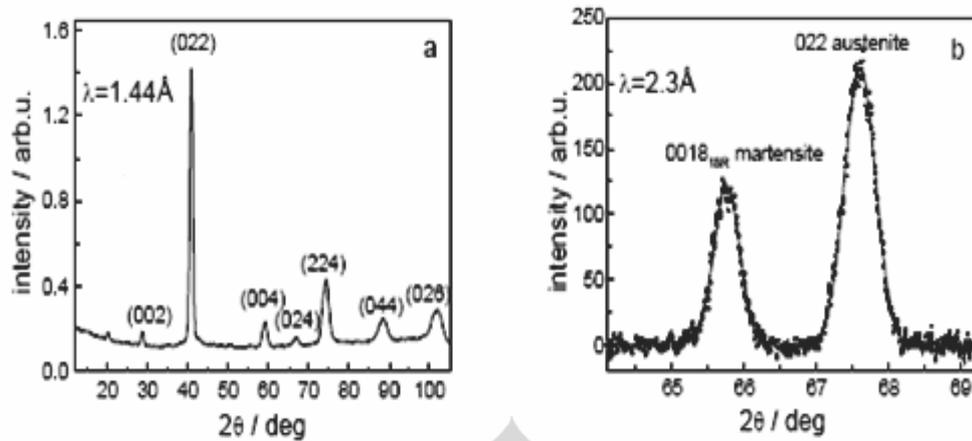
Gambar 2.14. Pola difraksi lapisan terhadap kadar Erbium (Er) untuk lapisan AlN (Er) yang dianil pada 873°K selama 1 jam^[18].

Sudut rendah puncak kisi Bragg, dan pengelompokan puncak sekitar (111) dari keseluruhan rata-rata jarak kisi bidang luar lihat Gambar 2.15. (a) dan (b). Sudut rendah spectrum XRD menunjukkan struktur berlapis-lapis tetap berlaku sampai temperatur 400°C. Spektrum XRD Gambar 2.15 tetap sama untuk waktu sesudah anil yang lebih lama (sampai 24 jam) pada temperatur 200 dan 300°C. Pengamatan intensitas kuat dari puncak kisi kristal setelah anil pada temperatur 200, 300 dan 350°C dapat di anggap berasal dari penajaman antar muka. Sudut menengah spectrum menunjukan bahwa pada temperatur 350°C fasa tambahan emas murni bersama-sama dengan ML (lapisan tipis Co-Au) sedangkan pada temperatur 400°C pelapisan struktur Co/Au dicegah, menunjukan penguraian hampir lengkap menjadi kristal Au dan Co. Meskipun puncak Bragg Au (emas) (200, $d_{200} = 0,2038$ nm) tidak dapat ditentukan dari puncak FCC Co (cobalt) (111, $d_{111} = 0,2047$ nm) atau puncak HCP Co (0002, $d_{0002} = 0,2023$ nm), pengamatan puncak intensitas diatas 350°C (dipusatkan di $2\theta = 44,404^\circ$ atau jarak antar kisi kristal (d) = 0,2038 nm) menunjukan bahwa intensitas difraksi dari kristal Co menunjukan pelebaran puncak yang banyak, kemudian pada 400°C terdapat satu sudut rendah puncak kisi kristal Bragg), dapat dinyatakan bahwa lapisan Co menjadi tidak kontinu oleh pembentukan kelompok dengan bentuk mirip kue pancake, seperti dalam Co/Ag ML's^[19].



Gambar 2.15. Temperatur pengembangan puncak sekitar puncak urutan nol dari kisi rata-rata ditunjukkan pada grafik yang dibawah. Spektrum XRD sudut rendah ditunjukkan gambar diatas^[19].

Fasa austenit BCC kristal majemuk dari CuAlZnMn ($a \sim 5,836$ angstrom) spektrum difraksi neutron pada temperatur ruang ditunjukkan Gambar 2.16. .a. Intensitas masing-masing puncak dipengaruhi oleh fenomena pengurutan yang rumit di material ini dan oleh tekstur penarikan. Transformasi martensit yang terjadi akibat tegangan menuju ke pembentukan partikel berbentuk pelat oleh dua tegangan baru fasa martensit dari fasa austenit. Mereka memiliki struktur monoklinik 18R dan ortorombik 2H. Transformasi $\beta 1 \rightarrow \beta 1'$ (18R) diasumsikan proses lebih disukai dalam keadaan tegangan tarik yang digunakan. Tegangan ini menyebabkan struktur martensit memiliki pondasi bidang tumpang tindih memantulkan angka 001818R dan 0022H yang tampak disekitar puncak (022) austenit yang kuat Gambar 2.16. b^[20].



Gambar 2.16. (a). Spektrum difraksi neutron pada $T=295^{\circ}\text{K}$, tidak ada tegangan (resolusi difraktometer medium), (b). Puncak difraksi neutron pada tegangan tarik maksimum $\sigma=334$ Mpa (deteksi regangan resolusi tinggi)^[20].

2.3. Anil Rekristalisasi

Melalui proses pengerolan dingin dan perlakuan panas pelunakkan anil, besar butir pelat kuningan 70Cu-30Zn dapat direkayasa sesuai dengan yang diinginkan. Ukuran butir yang besar cenderung tertunda perkembangannya dibandingkan dengan besar butir yang lebih kecil atau halus. Kecenderungan berhubungan dengan perubahan kekerasan melalui proses perlakuan panas pelunakkan anil pada temperatur yang rendah. Tidak ada perubahan besar butir dari perlakuan panas pelunakkan anil pada temperatur 150°C , baru pada temperatur 250°C terjadi perubahan struktur butir menjadi poligon, walaupun tempat pengintian butir baru terjadi pada area yang paling padat dislokasinya, ternyata pertumbuhan butir terjadi pada temperatur 350°C disekitar bidang geser kristal, sehingga perbedaan ukuran besar butir dipengaruhi oleh kecepatan rekristalisasi^[21].

Setelah pelat logam mengalami pengerolan pada temperatur ruang berulang kali, pada suatu saat pelat logam akan menjadi keras dan temperaturnya meningkat, disebabkan oleh terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*), akibat perubahan bentuk butir yang ellips menipis, menghalangi pergerakan dislokasi sehingga terjadi peningkatan kerapatan dislokasi, sehingga material dalam kondisi ini secara termodinamis tidak stabil, jika diberikan proses

perlakuan panas pelunakkan (anil), akan terjadi peningkatan aktivasi difusi dislokasi dan cacat kristal lainnya, untuk mencapai kondisi yang lebih stabil secara termodinamis. Proses perlakuan panas pelunakkan (anil) sebenarnya terdiri dari tiga tahap yang berlangsung secara simultan terdiri dari :

a. *Recovery*

Pada keadaan ini akan terjadi fenomena pergerakan dan penghilangan cacat titik yang berupa vakansi dan intertisi, termasuk juga penghilangan dan penyusunan kembali dislokasi, sehingga menghasilkan pembentuk *tilt* dan atau *twist long angle boundaries*. Pada saat recovery tidak terjadi perubahan fisik butir, perubahan yang terjadi hanya pengaturan kembali dislokasi di butir, sehingga kekerasan menurun sedikit akibat dari pengurangan kerapatan dislokasi dan cacat titik, serta pertumbuhan dari *sub grain* lihat Gambar 2.17 dan 2.18. Pemicu dari proses recovery yaitu pengurangan energi di dalam material dengan penataan ulang dislokasi. Mekanismenya yaitu pergerakan atom dan vakansi untuk menghasilkan pergerakan dislokasi. Hasilnya terjadi penghilangan tegangan sisa dan pembentuk daerah pengintian terjadinya rekristalisasi^[5,13-14,22].

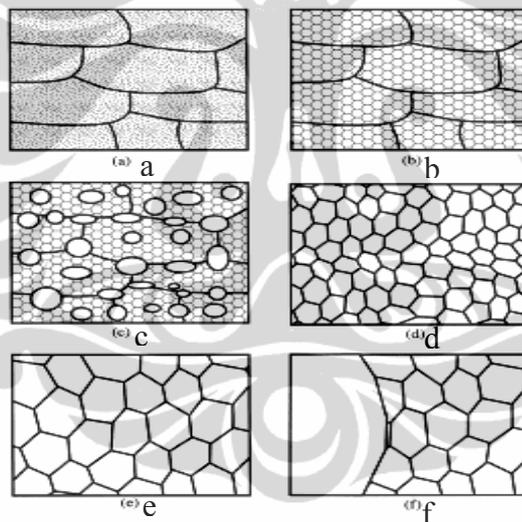
b. *Recrystallization*

Jika temperatur proses perlakuan panas pelunakkan (anil) dinaikkan, maka akan terjadi peningkatan aktivasi pengintian dan pertumbuhan dari butir yang bebas regangan, pada saat pertumbuhan butir dislokasi mengalami penghilangan di batas butir dari butir yang baru terbentuk, sehingga kekerasan menurun dan keuletan meningkat lihat Gambar 2.17 dan 2.18. Pada temperatur yang paling rendah, dimana butir bebas tegangan terlihat distruktur mikro dari yang sebelumnya mengalami deformasi plastis dinamakan temperatur rekristalisasi, tergantung dari ukuran butir, derajat deformasi dan kehadiran partikel fasa kedua. Temperatur rekristalisasi biasanya terjadi pada 1/3-1/2 dari temperatur lebur material tersebut. Pemicu dari proses rekristalisasi yaitu pengurangan lebih lanjut energi di dalam material, dengan menghilangkan sisa dislokasi dari proses *recovery*. Mekanismenya yaitu pertumbuhan daerah bebas tegangan, oleh masing-masing atom yang bergerak melintas keperbatasan antara butir bebas regangan

dan matriks. Hasilnya kumpulan butir baru pada arah kristal tertentu sehingga terjadi peningkatan keuletan lihat Gambar 2.15 dan 2.16^[5,13-14,22].

c. Pertumbuhan butir

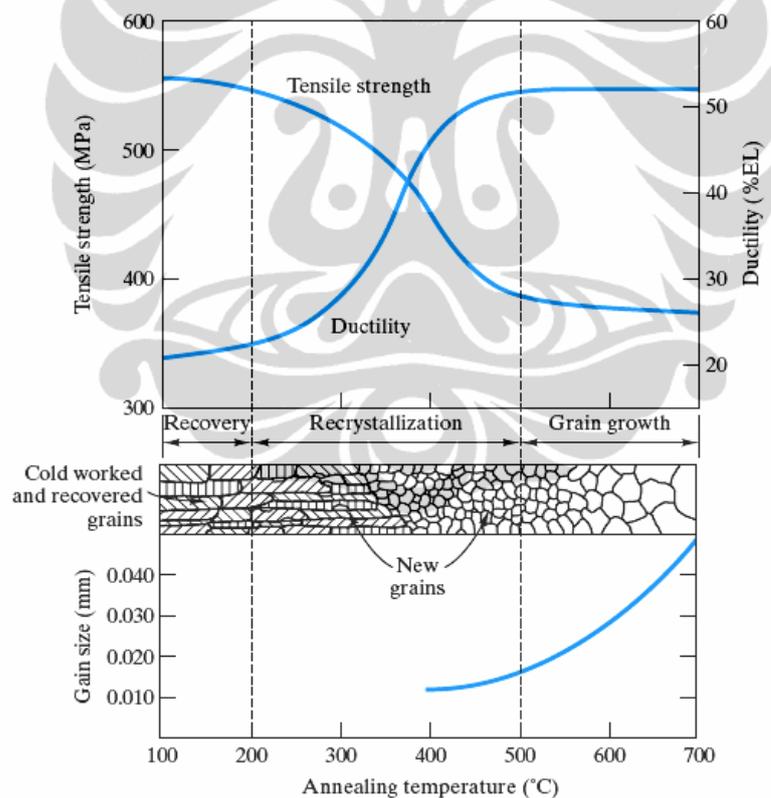
Jika proses perlakuan panas pelunakkan anil masih dilanjutkan di dalam tungku, pada temperatur yang sama atau lebih tinggi, maka akan terjadi pertumbuhan butir akibat dari terjadinya perpindahan batas butir antara butir yang telah mengalami anil dengan butir yang sudah tumbuh menjadi besar. Pertumbuhan butir tergantung dari energi batas butir atau pengurangan daerah batas butir terhadap keseluruhan volume material. Pemicu yaitu pengurangan energi batas butir. Mekanisme butir besar memakan butir kecil melalui difusi atom-atom pada batas butir. Hasilnya kekuatan menurun lihat Gambar 2.17 dan 2.18^[5,13-14,22].



Gambar 2.17. Proses anil, (a). Keadaan deformasi, (b). Pemulihan (recovery), (c). Rekristalisasi sebagian, (d). Rekristalisasi penuh, (e). Pertumbuhan butir, dan (f). Pertumbuhan butir tidak normal^[22].

Menurut W.Y. Yeung *et al*^[23], volume kembaran tidak pernah besar dan karakteristik penempatan kembaran dari reduksi 70% tidak terjadi, walaupun kembaran merupakan model pada deformasi rendah. Pengembangan pola dari pita geser berubah. Dengan adanya proses pengerolan dingin pada reduksi yang tinggi, setelah dianil akan menghasilkan kembaran-kembaran yang berpengaruh terhadap pola dari pita geser.

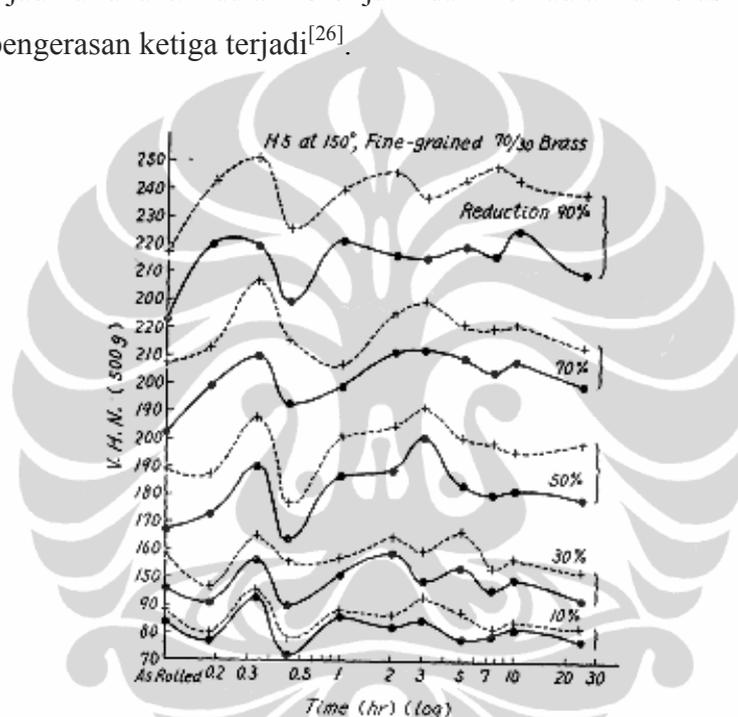
Menurut Osamu Izumi dan Tadatsugu Yoshiki^[24], pengaruh dari unsur pengotor Fe, P dan Pb, reduksi pengerolan dingin dan besar butir pada tungku anil tumpuk, dapat dikurangi dengan pemanasan pada temperatur 850°C diudara, ukuran butir untuk aplikasi praktis dapat diperoleh melalui pemanasan selama 1 menit. Harus diperhatikan bagaimanapun juga reduksi rendah terjadinya pertumbuhan butir tanpa pengintian karena rekristalisasi. Jika kecepatan pemanasan berbeda-beda dengan ketebalan pelat dan metode pemanasan, perilaku butir akan berbeda dari hasil percobaan. Metode anil dengan pemanasan cepat aplikasinya pada tungku anil kontinyu, kemudian perilaku dari besar butirnya tergantung dari kondisi pemanasan dan ukuran dari pelatnya, disamping itu juga dipengaruhi oleh unsur-unsur seperti Fe dan P, jika dilakukan anil dengan tungku statis terjadi campuran besar butir kecil dan besar.



Gambar 2.18. Perubahan kekuatan tarik, keuletan dan besar butir setelah pelat logam mengalami proses perlakuan panas pelunakkan (anil)^[25].

Pengaruh anil pada temperatur 150°C menunjukkan perubahan kekerasan dikuningan lihat Gambar 2.19, yang dipanaskan 10 menit sampai 24 jam setelah

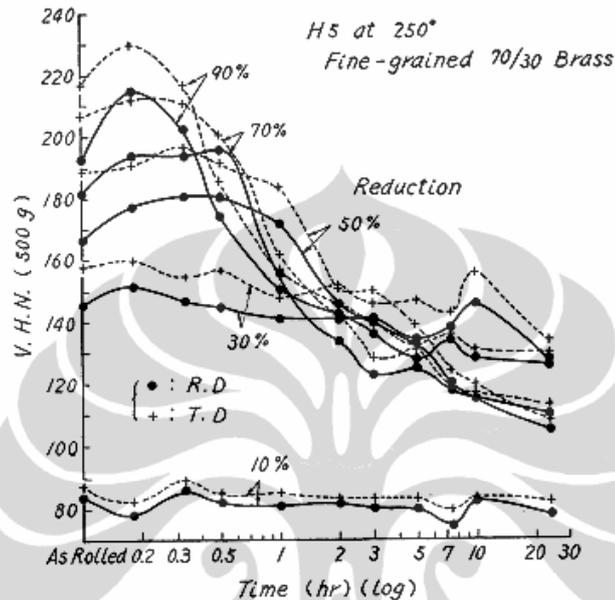
pengerolan akhir dengan reduksi 10-90%. Pada tahap awal pemanilan sekitar 20 menit terlihat pengerasan primer, tetapi ketika reduksi pengerjaan meningkat, titik maksimal kekerasan cenderung bergeser sedikit ke sisi waktu yang pendek. Setelah lewat tahapan ini perubahan kekerasan menuju ke proses pelunakan, dan kemudian pindah ke tahap pengerasan sekunder, sampai mencapai nilai tertinggi dalam 1-3 jam. Kekerasan dalam material berbutir halus berkurang sedikit ketika anil untuk waktu panjang, sedangkan material berbutir kasar, setelah pengerasan sekunder menjadi dilunakan dalam 3-5 jam dan kemudian dikeraskan kembali ketika tahap pengerasan ketiga terjadi^[26].



Gambar 2.19. Perubahan kekerasan temperatur 150°C butir halus pengerolan dingin 70/30, tanda titik hitam sejajar arah pengerolan, tanda (+) tegak lurus arah pengerolan^[26].

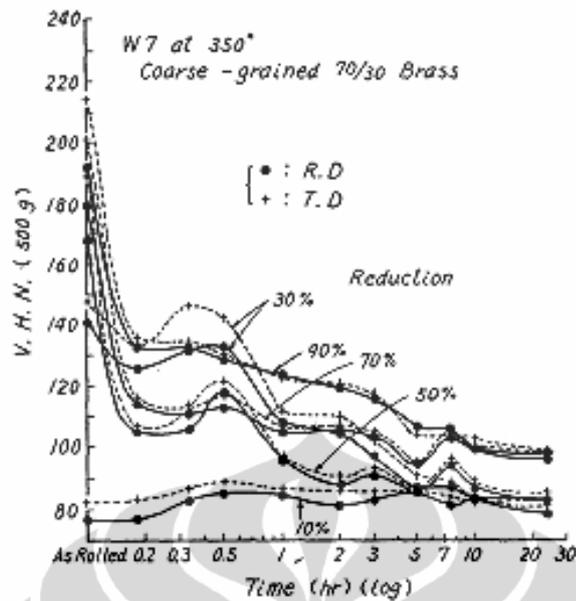
Ketika sampel dengan reduksi berbeda dipanaskan pada temperatur 250° selama 24 jam, rekristalisasi tidak terjadi pada reduksi dibawah 20%, tetapi diatas 50% proses rekristalisasi mulai setelah waktu tertentu. Kecenderungan kekerasan berubah berbeda dari keadaan temperatur 150°C, dan proses pengerasan dengan beberapa tahap tidak diamati pada rentang waktu penelitian. Sampel yang dirol dengan reduksi lebih dari 50% menunjukkan anil pengerasan sebelum rekristalisasi dan waktu anil perlu untuk mencapai kekerasan maksimum bergeser ke bagian waktu yang lebih singkat, kepada peningkatan reduksi pengerjaan dingin. Juga

dengan waktu awal rekristalisasi, tetapi cenderung tertunda pada material berbutir kasar. Perubahan kekerasan di material berbutir halus temperatur 250°C ditunjukkan Gambar 2.20. Jumlah anil pengerasan temperatur 250°C lebih kecil dari temperatur 150°C^[26].



Gambar 2.20. Perubahan kekerasan temperatur 250°C butir halus pengerolan kuningan 70/30^[26].

Pengaruh anil pada temperatur 350° pada reduksi 10% mulai rekristalisasi pada tahap awal pemanasan, dan perubahan kekerasan melalui proses pelunakan, oleh karena itu perubahan kekerasan ditunjukkan tidak kontinyu, pertama pelunakan cepat kemudian sedikit pengerasan dan akhirnya kembali pelunakan. Perubahan kekerasan pada kuningan berbutir kasar ditunjukkan di Gambar 2.19, dari gambar akan dapat dilihat bahwa reduksi lebih rendah, lebih terlihat ketidak kontinyu perubahan kekerasan Reduksi 10% mulai rekristalisasi pada tahap awal pemanasan, dan perubahan kekerasan melalui proses pelunakan, oleh karena itu perubahan kekerasan ditunjukkan tidak kontinyu, pertama pelunakan cepat kemudian sedikit pengerasan dan akhirnya kembali pelunakan. Perubahan kekerasan pada kuningan berbutir kasar ditunjukkan di Gambar 2.21, dari gambar akan dapat dilihat bahwa reduksi lebih rendah, lebih terlihat ketidak kontinyu perubahan kekerasan yang disebutkan diatas yang disebutkan diatas^[26].

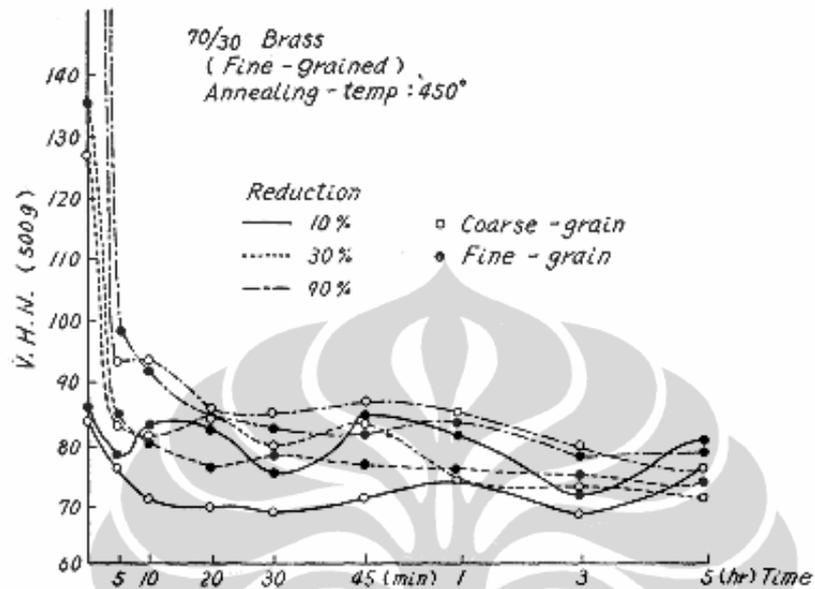


Gambar 2.21. Perubahan kekerasan pada temperatur 350°C pelat berbutir kasar, pengerolan dingin kuningan 70/30^[26].

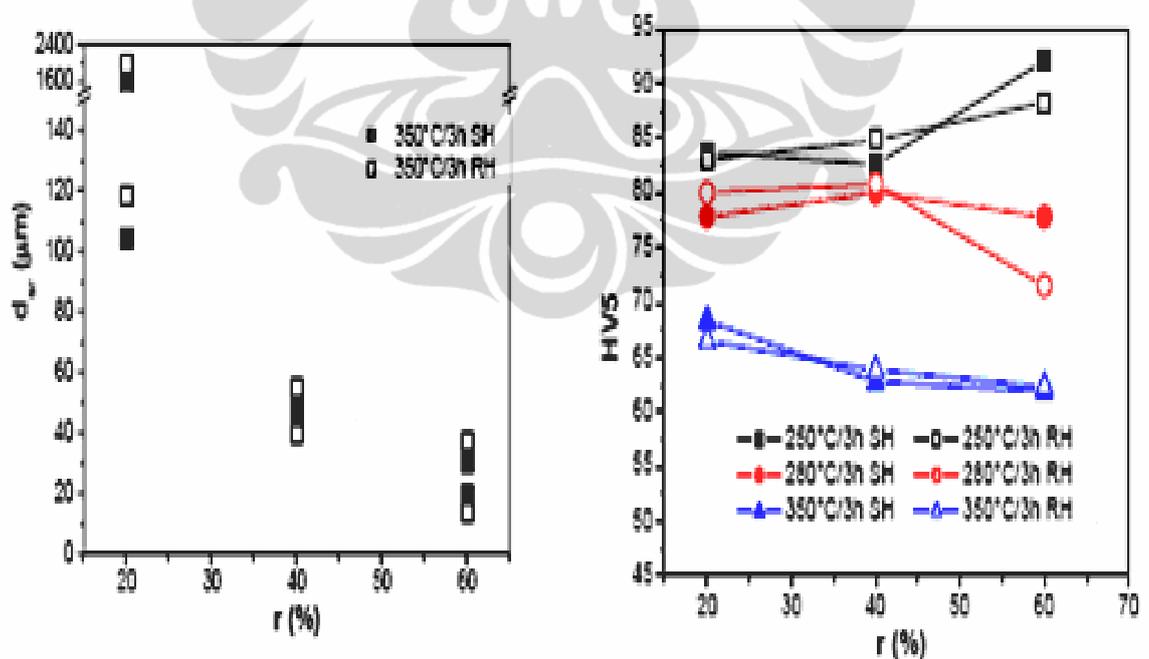
Pada anil temperatur 450°C kekerasan dalam setiap sampel berubah melalui proses pelunakan dari awal perlakuan panas, tetapi dalam sampel berbutir kasar perkembangan pelunakan lebih lambat ditunjukkan di Gambar 2.22. Meskipun material dengan reduksi 10% juga menunjukkan kecenderungan pelunakan, sulit untuk membedakan butir baru dengan mikroskop, tetapi garis peluncuran tidak tampil setelah penganilan. Pernyataan diatas seperti pelunakan tidak kontinyu di temperatur 350°C susah diamati pada temperatur 450°C^[26].

Perilaku rekristalisasi paduan Al-Mg-Cu (4,5% Mg dan 0,45% Cu) dilakukan proses termomekanikal yang berbeda, diamati melalui mikroskop optik dan pengujian kekerasan, supaya pengendapan partikel antar logam Cu-Mg terkendali, dilakukan dua tahapan anil pada temperatur 565°C waktu 6 jam dan 450°C waktu 4 jam, kemudian sampel dirol dingin dengan reduksi 20, 40 dan 60%, pada akhirnya dilunakan selama 3 jam pada temperatur 250, 280 dan 350°C, dengan kecepatan pemanasan rendah 0,6°C/menit dan cepat 25°C/menit. Setelah anil pada 250°C/3h pemulihan butir menguasai dalam struktur. Butir-butir rekristalisasi baru diperlihatkan hanya di beberapa butir, ketika reduksi 40 dan 60%. ketika $r = 40$ dan 60%. Pada temperatur 280°C campuran butir tidak

terekristalisasi dan butir rekristalisasi baru yang kecil (besar butir rata-rata 20 mikron) terlihat, sedangkan setelah anil pada temperatur 350°C dengan reduksi, proses rekristalisasi diselesaikan lihat Gambar 2.23^[27].

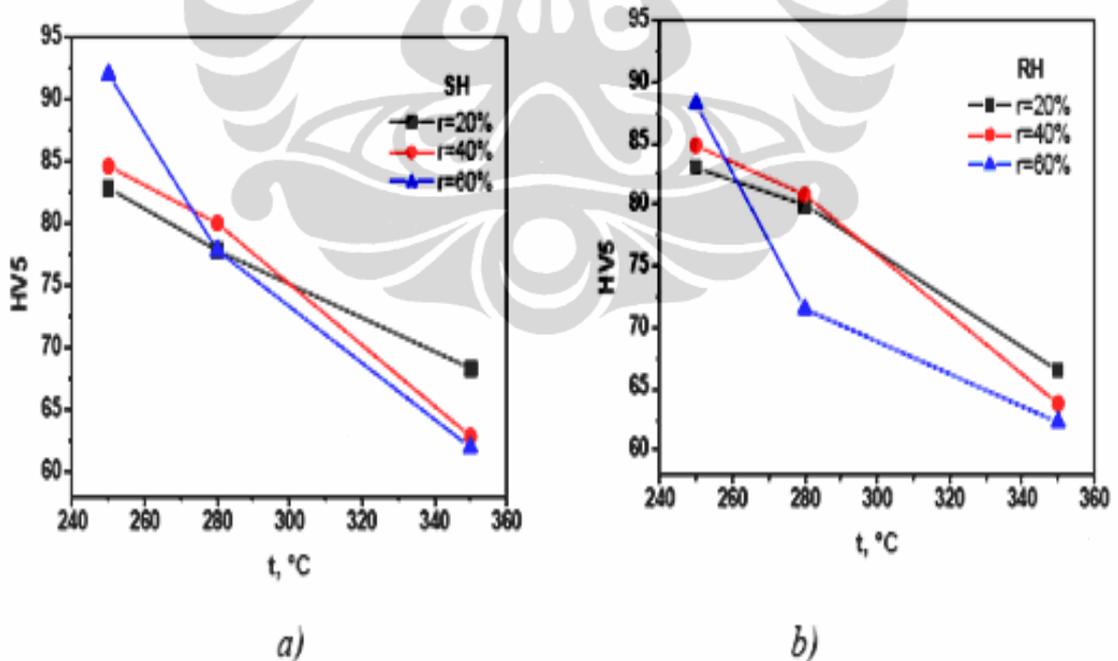


Gambar 2.22. Perubahan kekerasan pada temperatur 450°C pengerolan kuningan 70/30^[26].



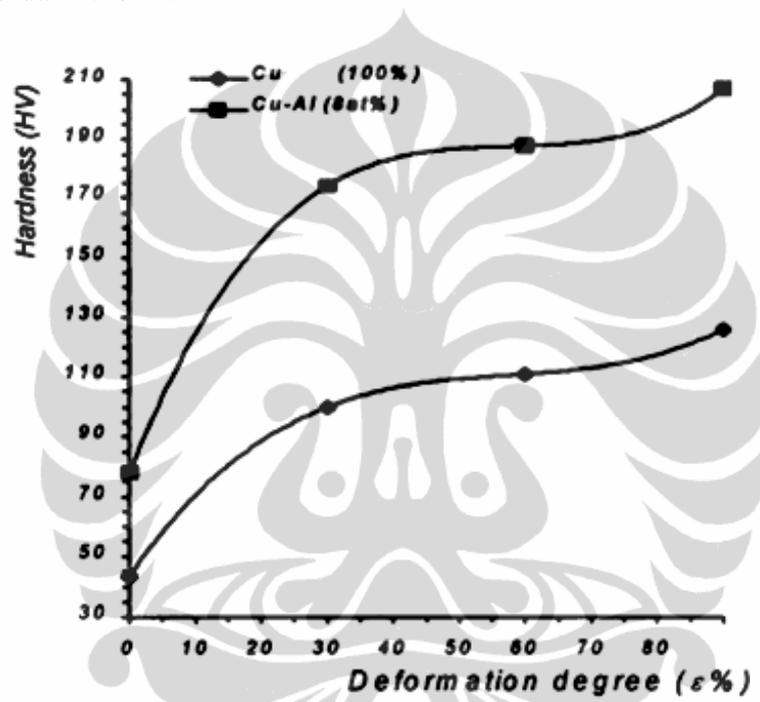
Gambar 2.23. Gambar kiri pengaruh reduksi pengerolan dingin dengan ukuran butir. Gambar kanan pengaruh reduksi pengerolan dingin terhadap kekerasan^[27].

Pengamatan-pengamatan ini di cocok dengan pengukuran kekerasan. Kecepatan pemanasan ditemukan juga mempengaruhi homogenitas distribusi ukuran butir. Pengembangan mikrostruktur setelah pengerolan dingin dan anil berhubungan erat dengan deformasi dan temperatur anil, peningkatan reduksi pengerolan dan temperatur anil menyebabkan rekristalisasi menghasilkan struktur butir terekristalisasi sebagian maupun penuh. Setelah anil pada temperatur 250°C dan 280°C untuk semua reduksi, *recovery* dan rekristalisasi sedangkan setelah anil pada temperatur 350°C rekristalisasi sebagian pada reduksi 20% atau rekristalisasi penuh pada reduksi 40 dan 60% telah terjadi. Ukuran butir terekristalisasi betul-betul dipengaruhi oleh reduksi pengerolan dingin sebelum anil dan diperhalus dengan reduksi pengerolan dingin. Kecepatan pemanasan mempunyai pengaruh pada rekristalisasi dan homogenitas struktur, struktur lebih homogen diperoleh ketika pemanasan lambat diterapkan, dianggap selama pemanasan kecepatan pertumbuhan butir lebih rendah, mendorong ke arah ukuran butir lebih seragam lihat Gambar 2.24^[27].



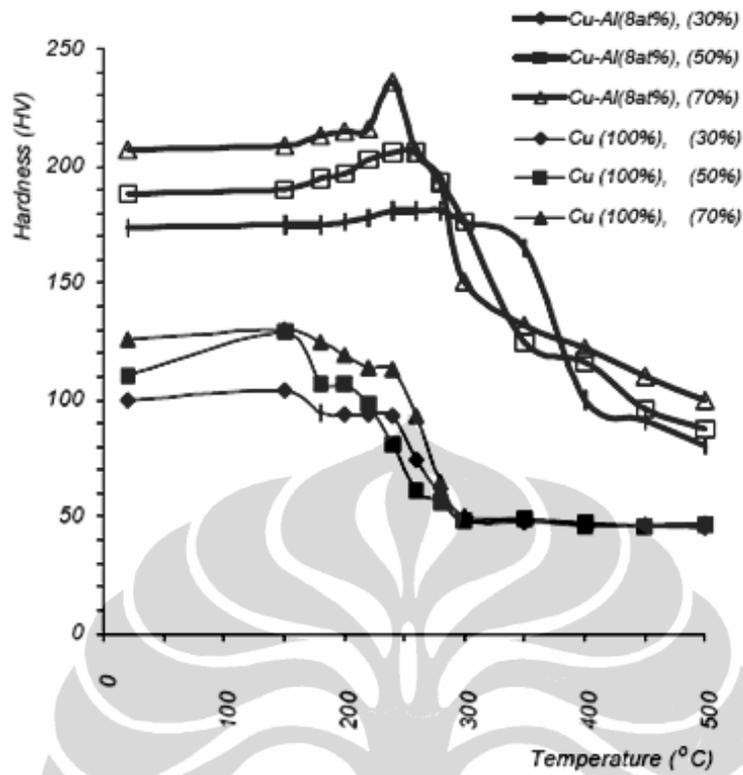
Gambar 2.24. Pengaruh temperatur anil dan kecepatan pemanasan terhadap kekerasan^[27].

Paduan tembaga cor dengan kandungan aluminium 8% dibandingkan dengan tembaga murni sebagai perbandingan, dilakukan pengerolan dingin dengan derajat deformasi 30, 50 atau 70%. Paduan tembaga dan tembaga dianil sampai temperatur rekristalisasinya. Kekerasan, kekuatan dan hantar listrik diukur, kemudian dilakukan juga analisa XRD dan energi tersimpan. Pengaruh anil pengerasan terjadi dipaduan ini pada temperatur 180-300°C, kekuatan meningkat dengan meningkatnya derajat deformasi pengerjaan dingin lihat Gambar 2.25 dan 2.26^[28].

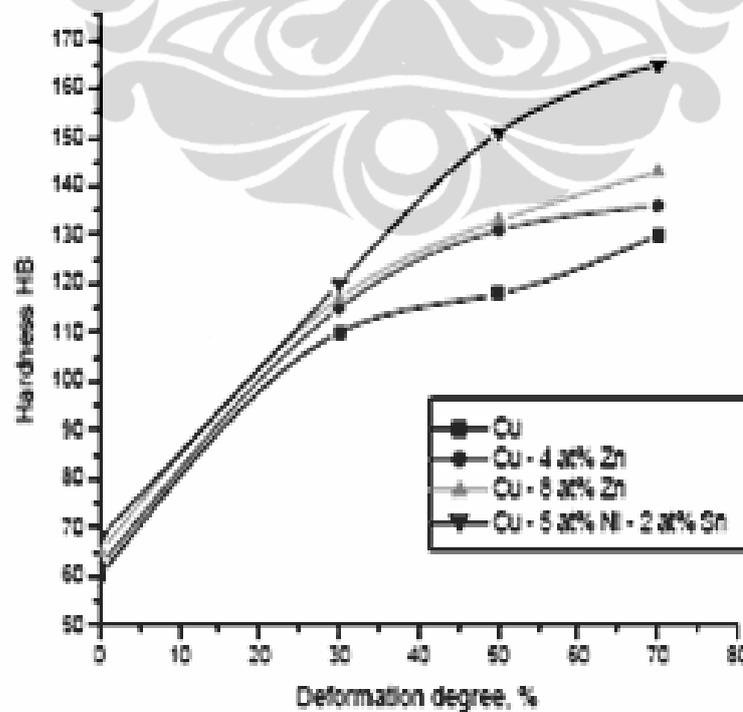


Gambar 2.25. Pengaruh reduksi pengerolan dingin dengan kekerasan^[28].

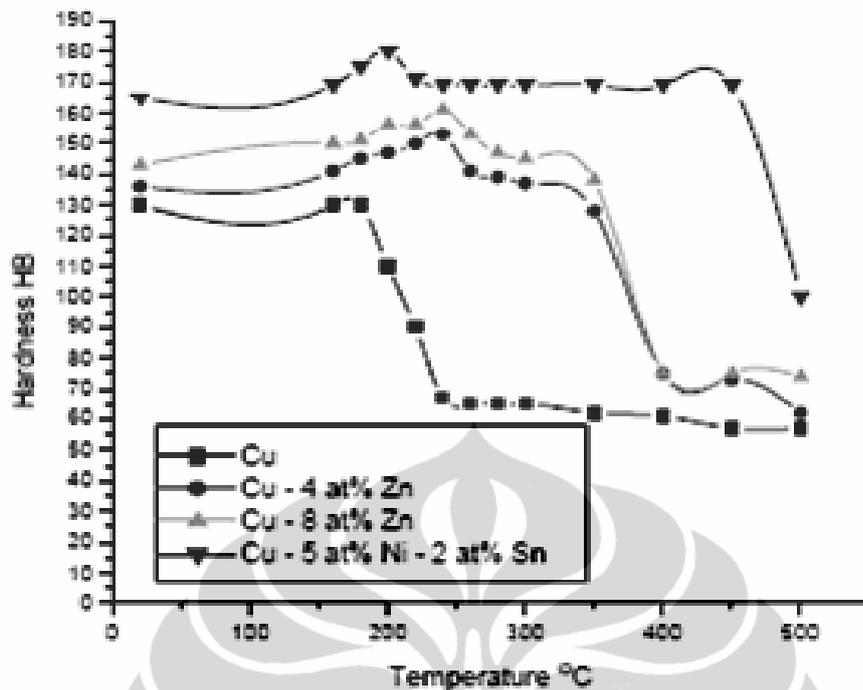
Paduan tembaga Cu-4%Zn, Cu-8%Zn dan Cu-5%Ni-2%Sn dan tembaga murni melalui teknologi metalurgi serbuk, dirol dingin dengan reduksi 30, 50 dan 70% kekerasannya meningkat dengan meningkatnya derajat reduksi lihat Gambar 2.27. Setelah di anil diantara temperatur 50 s/d 500°C, ternyata di dapatkan kekerasan optimal pada temperatur 180-400°C, dibawah 180°C terjadi kejadian anil pengerasan yang ditandai dengan meningkatnya kekerasan, kemudian menurun setelah mencapai temperatur 400°C yang disebabkan adanya pertumbuhan butir, lihat Gambar 2.28^[29].



Gambar 2.26. Kekerasan pelat yang dirol dingin dari sampel tembaga dan tembaga paduan dengan temperatur anil^[28].

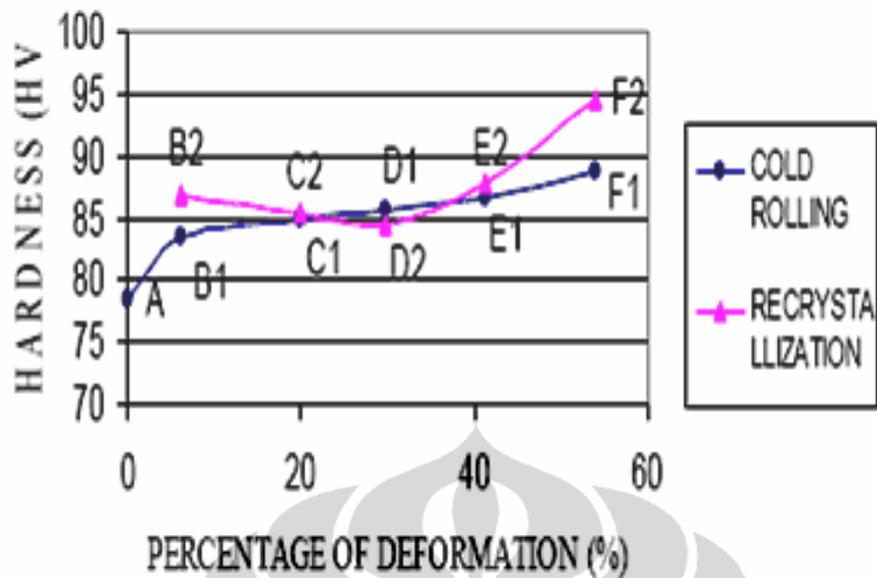


Gambar 2.27. Hubungan reduksi pengerolan dingin dengan kekerasan^[29].



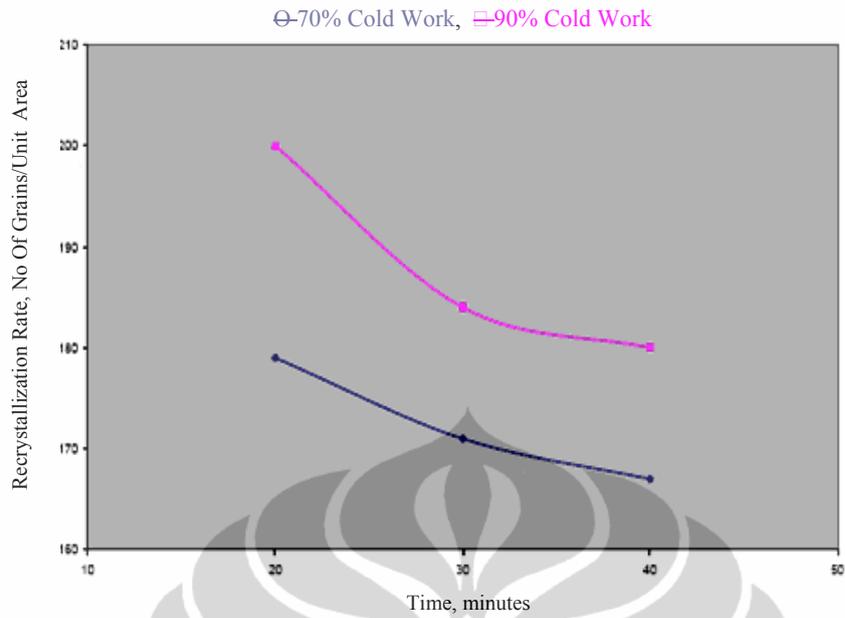
Gambar 2.28. Perubahan kekerasan sampel yang serbuk paduan tembaga yang disinter kemudian direduksi 70% melalui pengerolan dingin^[29].

Pengaruh dari berbagai persentase reduksi pengerjaan dingin dan rekristalisasi terhadap mikrostruktur dan kekerasan dari aluminium secara komersial murni, yaitu penghalusan butir di dalam aluminium yang diselidiki didapatkan melalui pengerolan dingin yang diikuti oleh rekristalisasi. Umumnya peningkatan persentase reduksi pengerolan dingin, struktur mikro butir menjadi memanjang searah arah pengerolan, terdapat hubungan kuat dari ukuran butir untuk material yang terekristalisasi, ketika peningkatan persentase deformasi dibawah deformasi kritis, ukuran butir meningkat, ukuran butir menurun dengan meningkatnya persentase reduksi diatas deformasi kritis lihat Gambar 2.29. Untuk plat aluminum secara komersial murni. Untuk deformasi ringan (kurang dari deformasi kritis 30%) di material yang terekristalisasi, ukuran butir meningkat dan kekerasan menurun. Untuk deformasi berat (didas deformasi kritis 30%) di material yang terekristalisasi, ukuran butir berkurang dan kekerasan meningkat dan material memperlihatkan perilaku pengerasan regangan^[30].

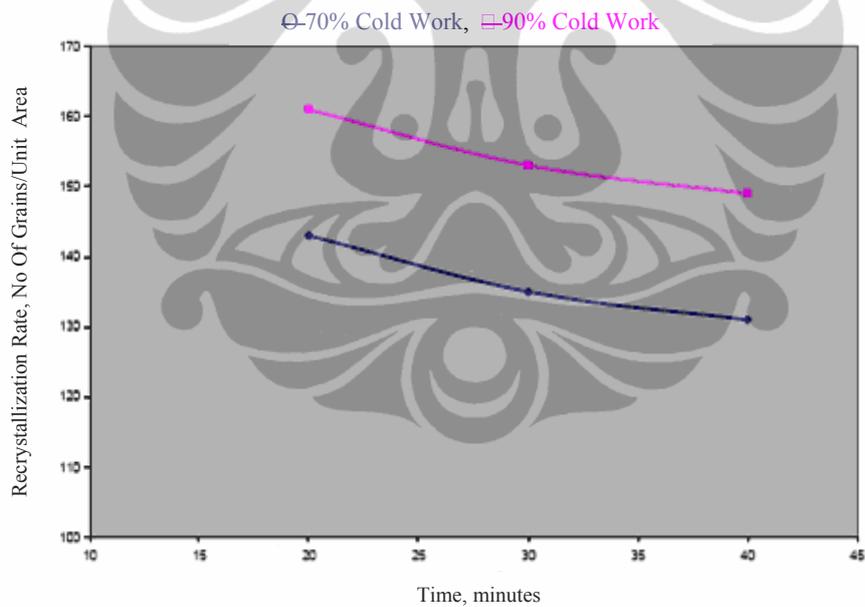


Gambar 2.29. Kekerasan terhadap persentase reduksi pengerolan dingin dan rekristalisasi^[30].

Pengaruh temperatur anil yang berbeda, waktu dan derajat deformasi terhadap kecepatan rekristalisasi paduan aluminium (6063). Sampel mengalami pengerolan dingin dengan reduksi 0, 70 dan 90% kemudian semua sampel diberikan perlakuan anil untuk membebaskan tegangan akibat proses deformasi, kemudian dilanjutkan dilaksanakan anil rekristalisasi dengan temperatur 380°C dan 450°C dengan waktu 20, 30 dan 40 menit. Menunjukkan hasil dengan reduksi pengerjaan dingin yang lebih tinggi, kecepatan rekristalisasi juga meningkat, kecepatan pengintian lebih tinggi dan butir lebih halus lihat Gambar 2.30 dan 2.31^[31].



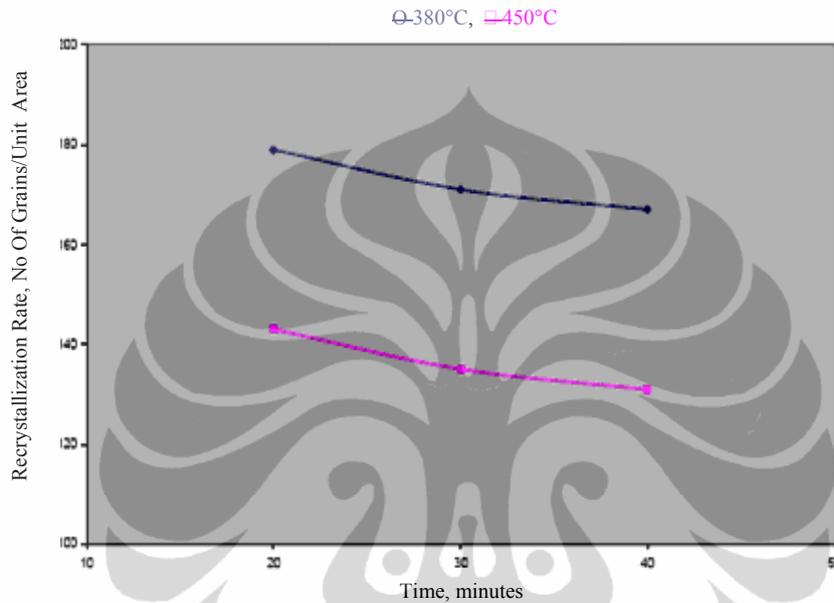
Gambar 2.30. Pengaruh waktu anil terhadap terhadap kecepatan rekristalisasi pada temperatur 380°C^[31].



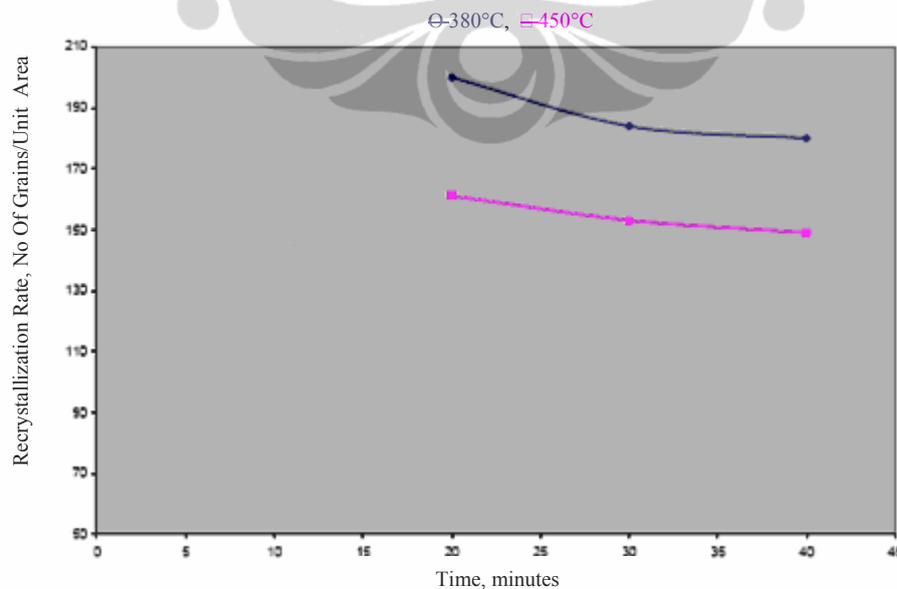
Gambar 2.31. Pengaruh waktu anil terhadap terhadap kecepatan rekristalisasi pada temperatur 450°C^[31].

Waktu anil lebih lama pada temperatur rekristalisasi tertentu, butir lebih besar karena waktu yang lebih lama untuk pertumbuhan butir. Rekristalisasi merupakan aktivasi termal dan kecepatan meningkat dengan meningkatnya

temperatur, dengan demikian semakin tinggi reduksi pengerjaan dingin, maka kecepatan rekristalisasi meningkat dan butir yang dihasilkan akan lebih halus, kemudian dengan waktu anil yang lebih lama pada temperatur rekristalisasi tertentu, akan terjadi butir lebih besar karena waktu untuk pertumbuhan butir lebih lama, karena rekristalisasi merupakan aktivasi termal dan kecepatan meningkat dengan meningkatnya temperatur lihat Gambar 2.32 dan 2.33^[31].



Gambar 2.32. Pengaruh waktu anil terhadap terhadap kecepatan rekristalisasi pada deformasi 70%^[31].



Gambar 2.33. Pengaruh waktu anil terhadap terhadap kecepatan rekristalisasi pada deformasi 90%^[31].

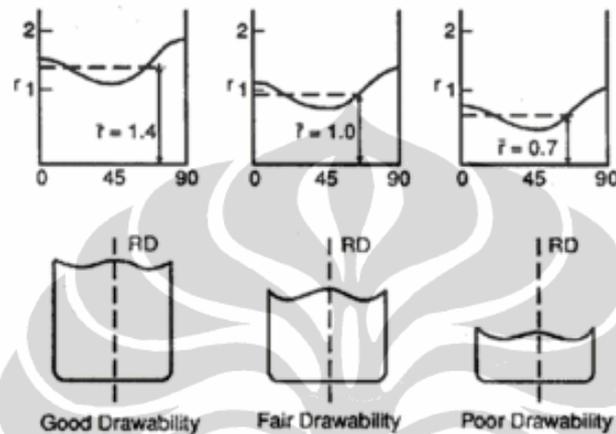
2.4. Kemampuan Bentuk Pelat

Kemampuan untuk menjangkau tingkat regangan yang tinggi tergantung beberapa faktor seperti material, unsur paduan, temper (pengerasan regang), nilai n , nilai m , nilai r , ketebalan, kehomogenan, dan kebebasan dari cacat-cacat dan pengotor. Nilai n atau koefisien pengerasan regangan ditentukan oleh ketergantungan dari tegangan alir (luluh) pada tingkat regangan tertentu. Material dengan nilai n tinggi, tegangan alir meningkat cepat dengan regangan. Hal ini menuju ke mendistribusikan lebih lanjut regangan kepada daerah regangan dan tegangan alir lebih rendah. Nilai n tinggi juga menunjukkan indikasi mampu bentuk pelat yang baik pada pengerjaan pembentukan regangan [32-33].

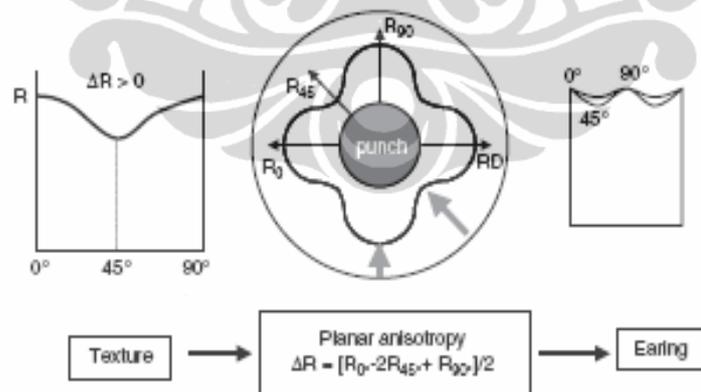
Untuk penggunaan tarik dalam, lembaran penting memiliki ketahanan yang tinggi terhadap penipisan (anisotropi di arah normal/tegak lurus) sedangkan aliran plastis di Untuk penggunaan tarik dalam, lembaran penting memiliki ketahanan yang tinggi terhadap penipisan (anisotropi di arah normal/tegak lurus) sedangkan aliran plastis di bidang lembaran terjadi dengan mudah di semua arah (isotropi di bidang). Parameter umumnya digunakan untuk menunjukkan sifat ini yaitu perbandingan regangan plastis ' r ' yang mengukur anisotropi normal dan Δr yang mengukur anisotropi planar. Pengelompokan bidang kristal pada arah tertentu (tekstur serat) (111) dengan bidang pelat normal/tegak lurus sebagai sumbu serat akan paling diinginkan untuk tarik dalam kriteria akan memberikan optimal r dan minimal nilai Δr lihat Gambar 2.34 dan 2.35. [13,33].

Menurut Osamu Izumi [35], nilai elastisitas pada pengerolan dengan reduksi dibawah 40% searah pengerolan menunjukkan maksimum pada reduksi 20-30%, disebabkan oleh terdapatnya area regangan tinggi yang tidak seragam sejajar dengan arah pengerolan dan terdapat dibatas butir. Pada reduksi 40-70% terjadi tahap transisi dimana distribusi regangan menjadi berangsur-angsur seragam kemudian nilai elastisitasnya yang terbedar pada arah melintang 90° yang terendah pada 45°. Pada reduksi tinggi sekitar 70% terjadi cacat seperti tanda-tanda regangan yang terlihat jelas disebagian besar arah melintang bersamaan dengan pembentukan tekstur pengerolan. Nilai elastisitas tertinggi pada arah melintang

yang terkecil searah pengerolan. Sifat anisotropy dan butir kasar berubah sedikit menuju kereduksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan butir halus. Anisotropy dapat mempengaruhi elastisitas suatu material yang diakibatkan oleh pengaruh pengerolan dingin dan besar butir, sehingga memungkinkan untuk mendeteksi perubahan pada material polikristal tanpa memberikan regangan plastis pada material tersebut.



Gambar 2.34. Variasi perbandingan regangan ‘r’ dengan arah pengerolan pada baja carbon rendah (gambar atas), pengaruh perbandingan regangan rata-rata terhadap drawability mangkok (gambar bawah), menunjukkan kedalaman pembentukan mangkok^[34].

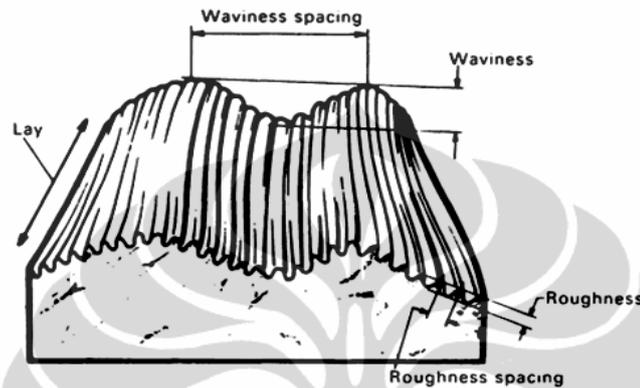


Gambar 2.35. Pengaruh nilai anisotropi planar (ΔR) terhadap tekstur, aliran material dan pengupingan^[14].

2.5. Kekasaran permukaan

Kekasaran adalah pengukuran tekstur permukaan yang dikuantitatifkan oleh penyimpangan vertikal permukaan sesungguhnya dari bentuk idealnya, jika

penyimpangan besar maka permukaan kasar, jika penyimpangan nya kecil maka permukaan akan halus lihat Gambar 2.36. Permukaan kasar menyebabkan terjadinya keausan lebih cepat dan memiliki koefisien gesekan lebih tinggi dari permukaan yang halus, seringkali kekasaran permukaan merupakan alat prediksi cepat terhadap sifat mekanis, karena kekasaran atau ketidak teraturan permukaan dapat berfungsi sebagai tempat awal terjadinya keretakan dan korosi^[36].



Gambar 2.36. Ilustrasi kekasaran permukaan, gelombang dan bentuk umum permukaan^[36].

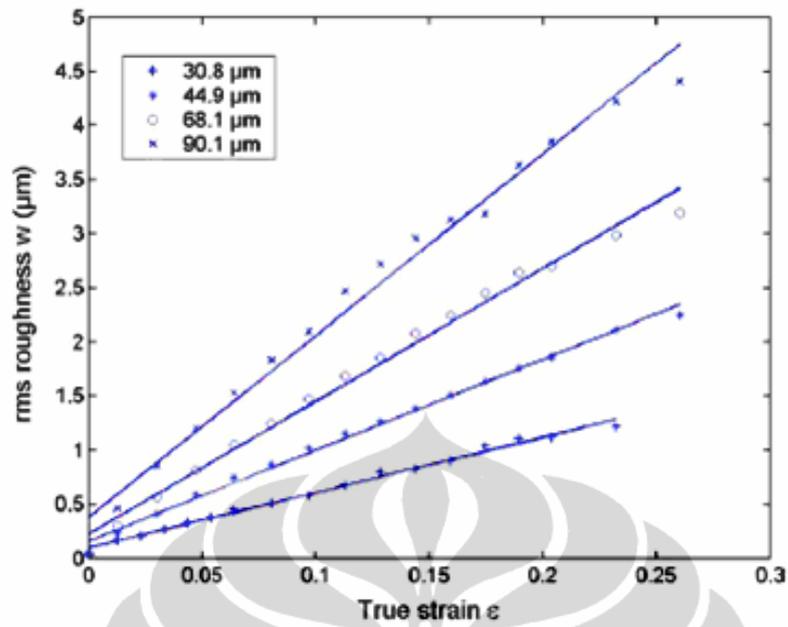
Sebagian besar permukaan logam memiliki jarak yang beraturan dan tidak, cenderung membentuk pola atau tekstur pada permukaannya. Tekstur permukaan ini disebabkan oleh proses manufaktur dan struktur mikro material. Sebagai contoh permukaan aluminium cor, umumnya menghasilkan permukaan bulat-bulat ketika dilakukan permesinan, sedangkan paduan aluminium dari pengerolan pada saat dilakukan permesinan, menghasilkan permukaan yang mengkilap, rata dan halus profilnya. Tegangan sisa yang terjadi setelah permesinan pada material menyebabkan deformasi permukaan, sehingga permukaan logam menjadi kasar ketika deformasi. Kekasaran tidak hanya mempengaruhi material, tapi juga sifat permukaan lainnya seperti pemantulan, aliran pelumas, kemudahan pengelasan, dan penempelan^[37].

Permukaan logam menjadi kasar ketika deformasi. Permukaan kasar juga memudahkan pembentukan tempat awal untuk peregangan setempat, yang dengan serius merusak sifat mekanis material. Hubungan antara kekasaran dan regangan kemudian kekasaran dan besar butir menunjukkan hubungan linier. Gambar 2.37

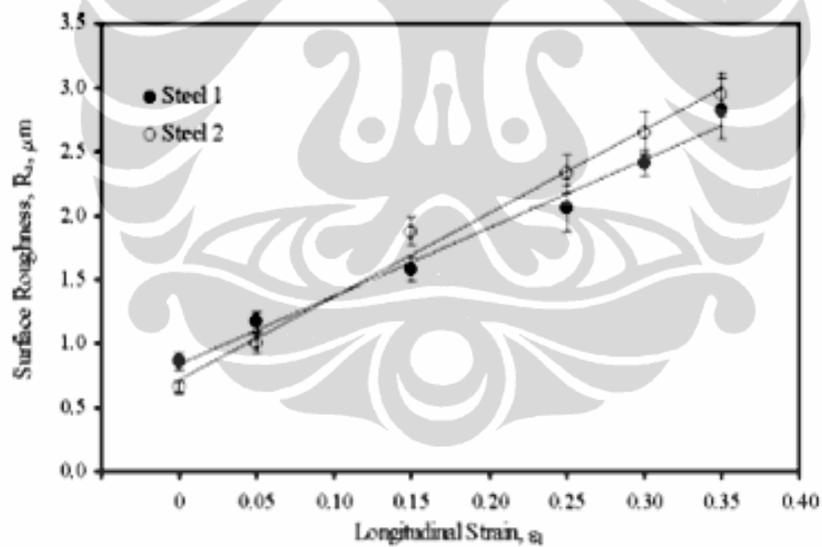
dengan jelas menunjukkan hubungan linier antara kekasaran, regangan dan besar butir yang diakibatkan terjadinya peluncuran dislokasi dengan cepat dipermukaan. Kekasaran hilang lenyap perlahan sampai setelah regangan sekitar 10%, kekasaran permukaan skala kecil tetap konstan. Pengaruhnya walaupun terdapat pengkasaran skala besar selama peregangan, pada bagian terkecil permukaan terjadi penghalusan. Disimpulkan kekasaran permukaan tampak didominasi oleh ketidak samaan dari struktur mikro yang diwujudkan dalam skala butir^[38].

Butir lebih lunak atau butir yang lebih mudah untuk di deformasi plastis terjadi deformasi lebih besar dibandingkan butir yang lebih keras, sehingga terjadi regangan yang lebih besar dibandingkan butir yang lebih keras, menyebabkan penipisan tidak merata dari material ini dan menyertai pengkasaran pada permukaan, kemudian arah butir tidak berubah dratis selama peregangan, deformasi ini pada ukuran besar butir merupakan proses konstan yang wajar. Dalam kenyataan material polikristal butir adalah bagian besar struktur tiga dimensi yang terdiri dari butir dengan semua arahnya berbeda. Deformasi butir oleh karena itu akan akan ditentukan oleh deformasi kombinasi dari butir sekitarnya, menghasilkan deformasi total dan menghasilkan kekasaran permukaan sulit untuk diperkirakan^[38].

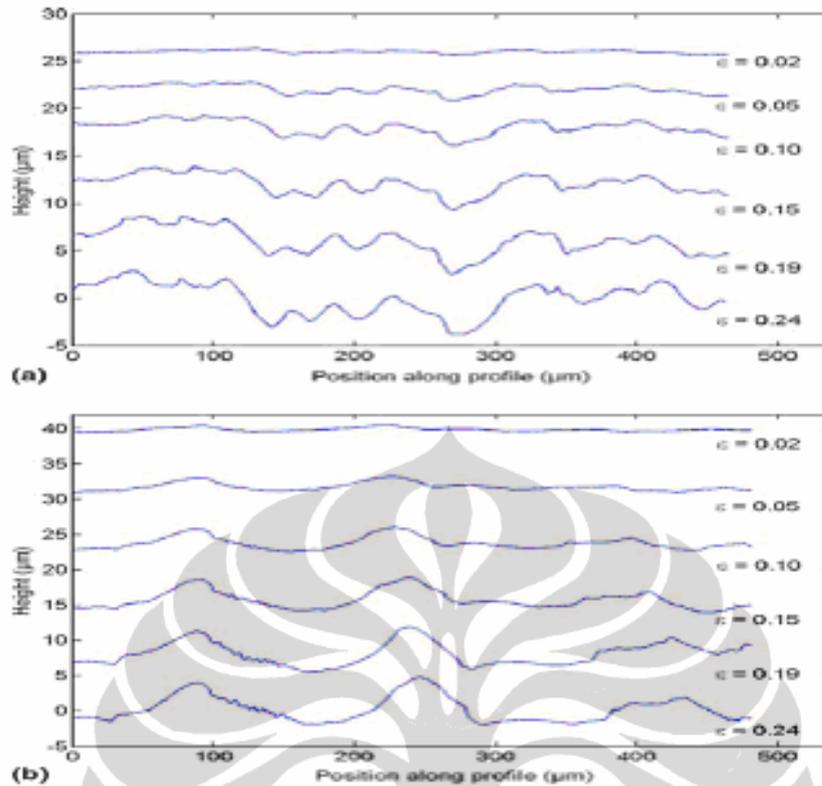
Ketika pelat logam mengalami pembentukan menjadi suatu produk tertentu dapat saja terjadi cacat pada permukaannya, yang terjadi karena struktur mikro atau melalui pengaruh parameter proses pembentukan atau pengkaratan. Pengkerutan kulit jeruk atau tanda bekas peregangan setelah selesai pembentukan pelat berhubungan langsung dengan hadirnya peluluhan tidak kontinyu di grafik tegangan regangan. Dalam industri pembentukan pelat, terjadi cacat permukaan selama pembentukan dinamakan pengkasaran permukaan akibat perubahan bentuk. Kualitas permukaan dari pelat logam berhubungan dengan proses pengerolan tahap akhir, dimana permukaan lebih halus didapatkan melalui permukaan pengerol lebih halus terutama pada pengerolan tahap akhir lihat Gambar 2.38 dan 2.39^[39].



Gambar 2.37. Hubungan regangan, besar butir dan kekasaran permukaan^[38].



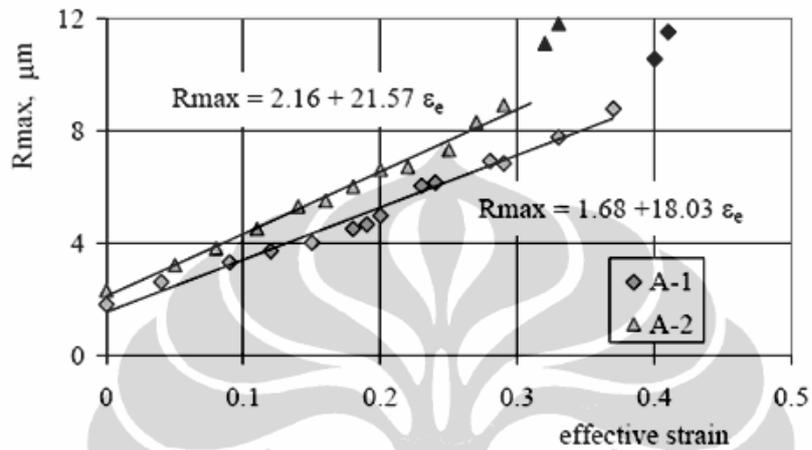
Gambar 2.38. Kekasaran permukaan lembaran logam meningkat dengan meningkatnya regangan^[39].



Gambar 2.39. Topografi permukaan dari hubungan besar butir dengan regangan (a). Permukaan pelat berbutir kecil, (b). Permukaan berbutir besar^[39].

Ketidak homogenan deformasi butir pada permukaan logam dipengaruhi oleh kesenjangan keterbatasan deformasi yang mengakibatkan pengkasaran permukaan. Deformasi plastis mengkasarkan permukaan dengan menghasilkan pita pergeseran di dalam butir dengan perputaran maupun pergeseran diantara mereka, sehingga kekasaran permukaan meningkat dengan hubungan linier terhadap besarnya derajat deformasi dan besar butir, tidak terpengaruh terhadap jenis tegangan dan kecepatan peregangan. Ukuran butir berperan penting untuk hasil akhir. Ukuran butir lebih halus biasanya dihubungkan dengan kekuatan tinggi dan ketangguhan dan lebih sulit untuk permesinan. Modifikasi besar butir karena proses seperti perlakuan panas dan *shoot peening* menghasilkan tegangan sisa, sifat anisotropi dan pengerasan peregangan menyebabkan kesulitan dalam pengerjaan akhir dan harus dikendalikan. Pengerasan regang menyebabkan pengerjaan akhir permukaan tidak merata. Kekasaran adalah pengukuran tekstur permukaan, dikuantitatifkan oleh penyimpangan vertical permukaan sesungguhnya dari bentuk idealnya, jika penyimpangan besar, permukaan kasar,

jika kecil permukaan halus. Permukaan kasar biasanya terjadi keausan lebih cepat dan memiliki koefisien gesekan lebih tinggi dari permukaan yang halus, seringkali merupakan prediksi yang baik dari sifat mekanis, kemudian ketidak teraturan permukaan dapat membentuk tempat pengintian untuk retak atau korosi lihat Gambar 2.40^[40].



Gambar 2.40. Kekasaran permukaan dalam kaitannya dengan regangan dan besar butir pelat aluminium^[40].