

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

2.1.1 Sifat-Sifat Aluminium

Aluminium memiliki struktur kristal *face centred cubic* (FCC) dengan kisi kristal $(a) = 4,0413 \text{ \AA}$ pada temperatur 25°C (Horn, 1967). Aluminium merupakan logam ringan, dimana memiliki berat 34% dari besi dengan volume yang sama, 30% dengan volume yang sama dibandingkan dengan tembaga, akan tetapi memiliki berat 1,5 kali dibandingkan dengan magnesium. Aluminium tidak beracun, tidak merubah warna makanan, tidak mempunyai rasa, maka dari itu aluminium banyak digunakan sebagai kemasan makanan (Fellers, 1990). Aluminium mempunyai ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik serta sifat-sifat lainnya sebagai sifat logam. Untuk menaikkan sifat mekaniknya, maka secara umum aluminium biasanya dipadu dengan menambahkan Si, Fe, Cu, Mn, Mg, dan Zn. Si dan Mg ditambahkan untuk menambah daya tahan terhadap korosi, Fe untuk mencegah terjadinya penyusutan, Cu untuk menambah kekuatan, dan Mn untuk memperbaiki mampu bentuk. Elemen-elemen tersebut ditambahkan baik secara satu-persatu atau bersama-sama. Penggunaan dari aluminium dan paduannya antara lain untuk peralatan rumah tangga, kemasan makanan dan minuman, pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi bangunan rumah, dll. Adapun sifat-sifat fisik aluminium murni ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Fisik Aluminium (Surdia dan Shinroku, 1992)

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Massa Jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik Cair	660,2	653-657
Panas Jenis (cal/g. $^\circ\text{C}$)(100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur ($^\circ\text{C}$)	0,00429	0,0115
Koefisien Pemuai (20- 100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis Kristal, konstanta kisi	FCC, $a = 4,013 \text{ \AA}$	FCC, $a = 4,04 \text{ \AA}$

2.1.2 Paduan Aluminium

Sebagaimana logam-logam lain, untuk merubah sifat aluminium menjadi lebih kuat, maka dipadu dengan unsur-unsur lain sesuai dengan kebutuhan dan penggunaannya. Paduan aluminium (*aluminum alloy*) banyak digunakan secara komersial karena mempunyai kekuatan yang lebih dibandingkan aluminium murni. Beberapa jenis logam ditambahkan kedalam aluminium murni dalam bentuk cair untuk menjadikannya lebih kuat dan lebih serbaguna. Unsur-unsur yang biasanya ditambahkan kedalam paduan aluminium adalah Cu, Zn, Mn, Mg, dan Si. Unsur-unsur tersebut jauh lebih tahan terhadap korosi dibandingkan dengan besi karbon, tetapi aluminium lebih tahan lagi terhadap korosi (Fellers, 1990). Komposisi kimia paduan aluminium didaftarkan pada asosiasi yang bernama *Aluminum Association* yang disingkat AA. Disamping itu ada organisasi lain yang mempublikasikan standar yang lebih khusus, seperti *Society of Automotive Engineers (SAE)* atau *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Paduan aluminium dengan sifat-sifat yang lebih luas digunakan untuk bagian-bagian mesin atau struktur lainnya. Sistem paduan (*Alloy systems*) diklasifikasikan dengan sistem nomor yang dikeluarkan oleh *American National Standard Institute (ANSI)*, dengan nama yang mengindikasikan besarnya elemen yang dipadukan (*Deutsches Institut Fur Normung - DIN* dan *International Organization of Standardization - ISO*) (Fellers, 1990). Dengan memilih paduan yang benar akan menghasilkan sifat-sifat paduan seperti; kekuatan (*strength*), keuletan (*ductility*), pembentukan (*formability*), dapat disambung (*weld-ability*) dan ketahanan terhadap korosi (*corrosion resistance*). Kekuatan dan daya tahan aluminium mempunyai variasi yang besar sehingga dapat digunakan sebagai paduan khusus dalam proses manufaktur.

Dalam hal paduan aluminium yang disiapkan sebagai bahan baku untuk pembuatan kemasan kaleng minuman dan kemasan lainnya diperkuat dengan menambahkan magnesium, untuk membentuk *aluminium magnesium alloy*, ditambahkan pula elemen lain seperti mangan dan chromium sebagai penguat dan juga untuk mengontrol mampu bentuk, memperbaiki ukuran butiran dan sifat-sifat lainnya. Paduan aluminium sebagai bahan baku kemasan yang diharapkan mempunyai kekuatan setinggi mungkin akan tetapi harus mudah dibentuk dan

kualitasnya memenuhi persyaratan kemasan kaleng minuman. Dengan cara memilih paduan yang tepat maka kemungkinan penipisan materialnya bisa dilakukan sehingga memberikan optimasi penggunaan material secara ekonomis (Horn, 1967). Komposisi dan struktur logam harus memberikan mampu bentuk pada waktu diproses pada line produksi, karena mampu bentuk dapat menentukan kinerja paduan aluminium itu sendiri. Pada umumnya paduan aluminium untuk kemasan kaleng adalah merupakan modifikasi komposisi paduan AA3004, dimana komposisi dalam % berat adalah: magnesium 0,5 – 1,5%, besi 0,1 – 1,0%, silikon 0,1 – 0,5%, chromium 0,1 – 0,4%, Zinc 0,0 – 0,25% zinc dan copper 0,0 – 0.25%, sedangkan sisanya adalah aluminium (Smith, 1979).

2.1.3 Klasifikasi Paduan Aluminium

Secara umum paduan aluminium diklasifikasikan menjadi 2 macam yaitu *wrought aluminum alloy* dan *cast aluminum alloy*. Kedua macam paduan ini dibedakan lagi menjadi paduan aluminium yang disiapkan untuk penggunaan panas (*heat treatable alloy*) dan penggunaan tanpa pemanasan (*non heat treatable alloy*). *Heat treatable alloy* disiapkan untuk penggunaan pada temperatur sampai dengan 200° C, diperkuat dengan cara menambahkan elemen-elemen lain yang membentuk senyawa *intermetallic*. Paduan aluminium yang termasuk dalam kelompok *heat treatable alloy* adalah seri 2xxx, 6xxx dan 7xxx. Paduan aluminium seri 2xxx merupakan paduan aluminium dengan copper, magnesium, dan mangan. Salah satu paduan aluminium seri 2000 adalah 2024 (Al₂CuMg) yang digunakan sebagai rangka pesawat. Paduan aluminium yang termasuk dalam kelompok *non heat treatable* adalah seri 1xxx, 3xxx, 5xxx, dan beberapa dari seri 4xxx, dimana untuk menambah kekuatannya dilakukan dengan cara pengerjaan dingin. Paduan aluminium seri 1xxx dan seri 3xxx adalah merupakan paduan fasa tunggal dimana kandungan aluminium nya mencapai 97 ~ 99%, dengan sedikit penambahan Fe, Cu, dan Si yang dapat menambah kekuatan. Paduan aluminium seri 3xxx adalah merupakan paduan aluminium dengan mangan sebagai unsur pembentuk larutan padat (*solid solution*) yang sekaligus sebagai penguat. Sedangkan Aluminium seri 5xxx adalah merupakan paduan aluminium dengan magnesium, dimana terbentuk fasa α yang merupakan larutan

padat yang dapat memperkuat paduan ini, dan senyawa Mg_2Al_3 yang membuat paduan ini menjadi keras. Tabel 2.2 menunjukkan komposisi kimia untuk *wrought aluminum alloy*, dimana setiap seri mempunyai 4 digit angka yang mempunyai arti, digit pertama menandakan kelompok elemen pepadu terbanyak, digit kedua mengindikasikan hasil modifikasi atau batas ketidakmurnian dan dua digit terakhir merupakan indikasi dari paduan atau tingkat kemurnian. Paduan aluminium seri 3xxx adalah yang digunakan sebagai bahan baku badan kaleng dua bagian (*two-piece can*) dengan proses *drawn wall ironing*, sedangkan untuk bagian tutupnya menggunakan paduan aluminium seri 5xxx. Pada awalnya untuk badan kaleng dengan ketebalan di atas 0,290 mm menggunakan paduan AA3004, dan seiring dengan dilakukannya penurunan ketebalan maka dilakukan modifikasi komposisi kimia yang selanjutnya berubah menjadi paduan AA3104. Angka 1 pada digit ke dua merupakan indikasi dilakukannya modifikasi dari paduan AA3004.

Tabel 2.2 Komposisi Kimia *Wrought Aluminum Alloy* (Alcoa 1995)

Seri	Unsur Pepadu Utama
1xxx	Aluminium Minimum 99%
2xxx	Copper (1,9% - 6,8%)
3xxx	Manganese (0,3% - 1,5%)
4xxx	Silicon (3,6% - 13,5%)
5xxx	Magnesium (0,5% - 5,5%)
6xxx	Magnesium dan Silicon (Mg 0,4% - 1,5%, Si 0,2% - 1,7%)
7xxx	Zinc (1% - 8,2%)
8xxx	Lain - lain

Tabel 2.3 menunjukkan komposisi kimia *Cast Aluminum Alloy*, dimana setiap seri mempunyai 4 digit angka yang mempunyai arti, digit pertama menandakan kelompok elemen pepadu terbanyak, digit kedua mengindikasikan tingkat kemurnian, dua digit terakhir mengindikasikan asal *casting* (0) atau *slab* (1 atau 2) tergantung pada batas komposisi kimia.

Tabel 2.3 Komposisi Kimia *Cast Aluminum Alloy* (Alcoa 1995).

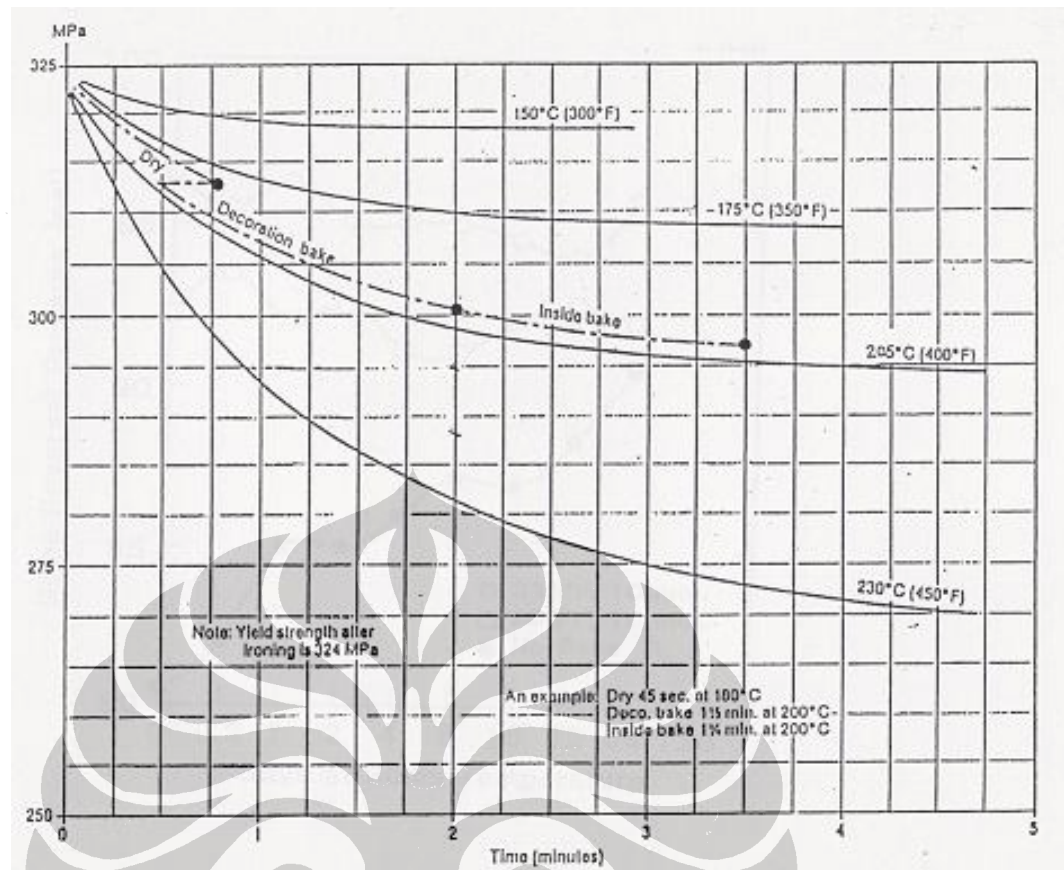
Seri	Unsur Padu Utama
1xx.x	Aluminium minimum 99,0%.
2xx.x	Copper (4,0% - 4,6%)
3xx.x	Silicon (5,0% - 17,0%) dengan ditambahkan copper dan/atau magnesium
4xx.x	Silicon (5,0% - 12,0%)
5xx.x	Magnesium (4,0% - 10,0%)
7xx.x	Zinc (6,2% - 7,5%)

Tabel 2.4 adalah merupakan ciri-ciri sifat mekanis secara umum dari paduan aluminium seri 3xxx yang digunakan sebagai bahan baku kemasan kaleng dengan proses *drawn wall ironing*. Dimana setelah dilakukan pemanasan dengan temperatur 210° C selama 10 menit, mengalami penurunan kekuatan. Yaitu, kekuatan luluh (*yield strength*) turun 9,9% dan kekuatan tarik (*tensile strength*) turun 9,9%, sedangkan *elongation* tidak terjadi perubahan.

Tabel 2.4 Sifat Mekanis Paduan Aluminium Untuk Badan Kaleng (Alcoa 1995).

Seri Paduan	Sifat Mekanis					
	Sebelum Pemanasan			Setelah Pemanasan 210° C selama 10 menit		
	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation %	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation %
AA3004	303	276	5	283	255	5
AA3104	310	283	5	290	262	5
AA3204	317	290	5	296	268	5

Gambar 2.1 menunjukkan efek pemanasan selama proses produksi kemasan kaleng terhadap kekuatan luluh (*yield strength*) paduan aluminium AA3004, dimana setelah pemanasan, *yield strength* menurun, hal ini merupakan ciri dari material yang dikuatkan dengan proses *strain hardening*.



Gambar 2.1 Grafik Efek Pemanasan Selama Proses Produksi Kemasan Kaleng Terhadap *Yield Strength* Paduan Aluminium AA3004 (Alcoa 1995)

2.1.4 Penguatan Aluminium

Pada umumnya tingkat kekuatan logam ditentukan oleh kemampuan atom-atom dalam kristal mengalami pergeseran (dislokasi) ketika diberikan beban secara plastis. Semakin besar energi yang dibutuhkan untuk melakukan pergeseran atom-atom, berarti semakin kuat logam tersebut. Terbentuknya dislokasi tidak hanya ditentukan oleh kerapatan atom-atom, akan tetapi ditentukan juga oleh faktor rintangan (*barrier*) yang terjadi dalam kristal. Semakin besar rintangan, maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi, yang berarti semakin kuat logam tersebut (Adnyana, 1994).

Penguatan aluminium bisa dilakukan dengan proses pemaduan dengan elemen-elemen lain (*solid solution hardening*), penguatan dari batas kristal (*grain boundary hardening*), penguatan karena efek pengerjaan dingin (*cold work*), dan penguatan dengan pembentukan partikel halus dalam kristal (*precipitation hardening*).

2.1.4.1 Penguatan Aluminium Karena Pemaduan (*Solid Solution Hardening*)

Logam aluminium murni mempunyai kekuatan yang rendah, untuk menambah kekuatan maka perlu ditambahkan elemen-elemen padu kedalam logam aluminium tersebut agar kekuatannya dapat ditingkatkan. Elemen-elemen padu tersebut dapat menambah efek rintangan terhadap pergeseran atom-atom dalam kristal. Apabila atom terlarut (*solute*) kira-kira sama besarnya dengan atom pelarut (*solvent*) yang dalam hal ini aluminium maka atom terlarut akan menduduki tempat kisi (*lattice point*) dalam kisi kristal atom aluminium. Hal ini disebut larutan padat substitusi (*substitutional solid solution*). Akan tetapi apabila atom terlarut jauh lebih kecil dari atom pelarut, maka atom terlarut menduduki posisi sisipan (*interstitial solid solution*) dalam kisi pelarut. Hasil penambahan unsur terlarut pada umumnya adalah meningkatkan tegangan luluh, karena atom terlarut memberikan tahanan yang lebih besar terhadap gerakan dislokasi dari pada terhadap penguncian statis.

2.1.4.2 Penguatan Aluminium Akibat Batas Kristal (*Grain Boundary Hardening*)

Batas kristal atau batas butir dari struktur logam merupakan daerah pertemuan antara kristal, sehingga pada daerah tersebut susunan atom-atomnya menjadi tidak teratur (Adnyana, 1994). Akibatnya atom-atom pada batas kristal mempunyai mobilitas atau tingkat energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan atom-atom didalam kristalnya. Karena itu apabila terjadi deformasi plastis maka dislokasi pada umumnya terjadi dari batas kristal dan kemudian bergerak didalam dan berhenti pada batas kristal berikutnya. Hal ini berarti disamping sebagai tempat awal terjadinya dislokasi, batas kristal juga berlaku sebagai penghalang dislokasi. Jadi untuk logam yang mempunyai kristal tunggal, tidak memberikan halangan yang berarti terhadap pergerakan dislokasi, sehingga kekuatannya rendah. Karena itu agar aluminium mempunyai kekuatan yang lebih besar maka perlu dilakukan penambahan elemen-elemen lain yang memungkinkan terbentuknya kristal majemuk. Pada logam dengan kristal yang besar, jumlah batas kristal (batas butir) tidak sebanyak jika dibandingkan logam dengan kristal yang kecil (butirannya halus), yang berarti semakin banyak batas kristal (kristal

nya semakin halus) maka semakin besar tingkat rintangan yang terjadi terhadap gerakan dislokasi, yang berarti semakin kuat logam tersebut (Adnyana, 1994).

2.1.4.3 Penguatan Aluminium Karena Efek Pengerjaan Dingin (*Strain Hardening*)

Untuk meningkatkan kekuatan lembaran aluminium, setelah proses pengerolan panas (*hot rolling*) lalu dilanjutkan dengan proses pengerolan dingin (*cold rolling*). Hasil pengerolan panas belum memberikan kekuatan yang tinggi terhadap pelat, tetapi setelah dilakukan pengerolan dingin maka lembaran/pelat tersebut akan mengalami peningkatan kekuatan (Adnyana, 1994). Efek pengerolan dingin ini sering disebut sebagai efek *strain hardening* atau efek pengerasan akibat regangan. Mekanisme penguatan ini terjadi karena peningkatan kerapatan dislokasi dalam kristal logam dimana dislokasi yang telah terbentuk tersebut dapat berfungsi sebagai penghalang terhadap gerakan dislokasi pada deformasi berikutnya. Pada pengerjaan dingin kondisi energi intern logam lebih tinggi dibandingkan dengan logam yang tidak terdeformasi. Walaupun struktur sel dislokasi hasil pengerjaan dingin stabil secara mekanis, namun secara termodinamis struktur sel ini tidak stabil. Oleh karena itu, dengan meningkatnya temperatur, maka keadaan pengerjaan dingin menjadi semakin tidak stabil. Akibatnya logam menjadi lunak dan kembali ke kondisi bebas regangan.

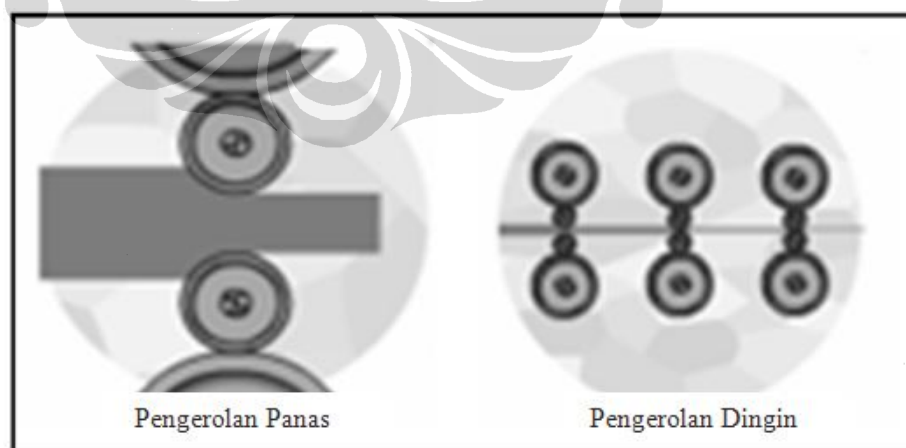
2.1.4.4 Penguatan Aluminium Dengan Pembentukan Patikel Halus Dalam Kristal (*Precipitation Hardening*)

Dengan pengaturan komposisi kimia dan proses pengerjaan/perlakuan panas, paduan logam dapat memberikan struktur yang mengandung partikel-partikel halus didalam kristal. Pembentukan partikel halus tersebut dapat dicapai melalui perubahan tingkat kelarutan dari suatu unsur atau senyawa dari suatu paduan atau menambahkan partikel-partikel yang keras seperti oksida atau karbida kedalam logam (Adnyana, 1994). Cara ini menghasilkan *precipitation hardening* atau *age hardening* dan *dispersion hardening*. Pengerasan presipitasi atau endapan (*precipitation hardening*) dihasilkan dengan perlakuan pelarutan dan pencelupan suatu paduan. Agar terjadi pengerasan endapan, fasa kedua harus dapat dilarutkan pada temperatur tinggi, tetapi harus memperlihatkan kemampuan

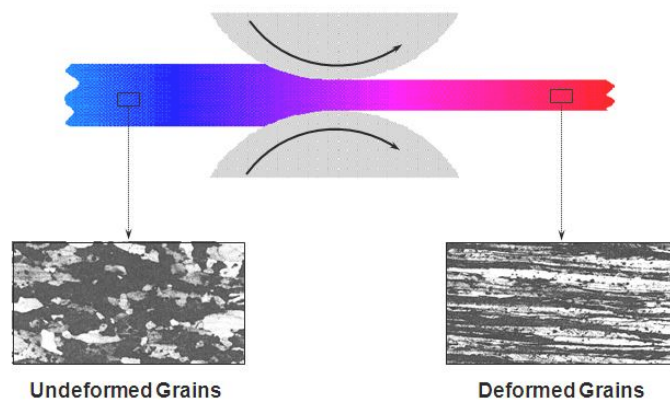
larut yang berkurang dengan turunnya temperatur. Sebaliknya, fasa kedua dalam sistem pengerasan dispersi memiliki kemampuan larut yang sangat kecil di dalam matriksnya.

2.1.5 Proses Pengerolan Aluminium Untuk Bahan Baku Badan Kaleng

Lembaran aluminium untuk badan kaleng berasal dari penipisan balok aluminium (*slab*) yang berukuran sekitar 500 mm x 1600 mm x 4500 mm dengan cara pengerolan panas sampai dengan 2,3 mm. Selanjutnya diteruskan dengan pengerolan dingin sampai pada ketebalan yang diinginkan. Rasio pengerolan panas atau pengerolan dingin disesuaikan pada kekerasan yang ingin dicapai tergantung pada sifat-sifat yang diperlukan sesuai peruntukannya. Sebelum pengerolan panas, *slab* dipanaskan terlebih dahulu dalam suatu ruangan dengan temperatur 600° C selama 12 – 48 jam, tujuannya adalah untuk memodifikasi struktur mikro dan memudahkan dilakukan pengerolan. Setelah mencapai ketebalan yang diinginkan lalu dilapisi dengan pelumas pada kedua sisinya untuk menghindari oksidasi dan memudahkan proses pembentukan badan kaleng dengan proses *drawn wall ironing*. Adapun proses pengerolannya dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan bentuk struktur mikro lembaran berubah setelah pengerolan dingin karena terdeformasi (gambar 2.3).



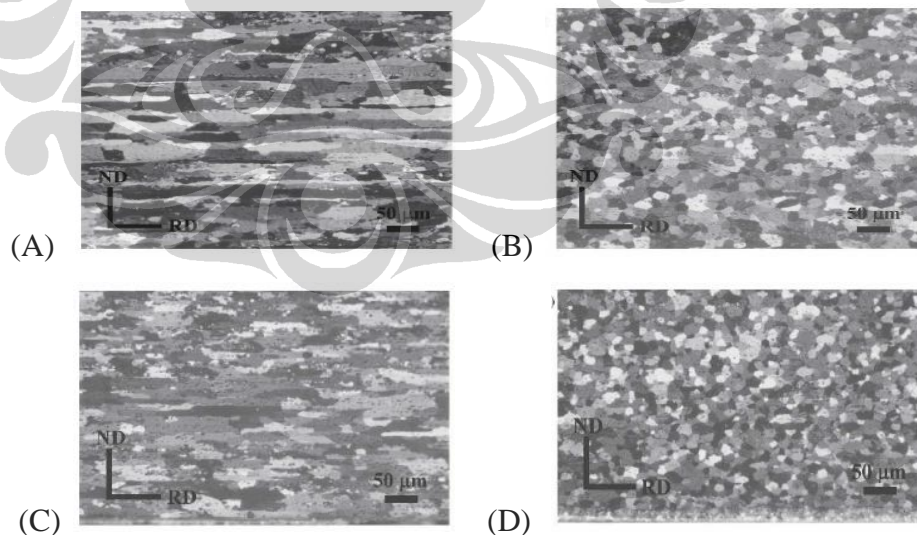
Gambar 2.2 Sketsa Proses Penipisan Aluminium (Sanders, 2001)



Gambar 2.3 Sketsa Perubahan Bentuk Batas Butir (*grains*) Setelah pengerolan Dingin (Alcoa, 2000)

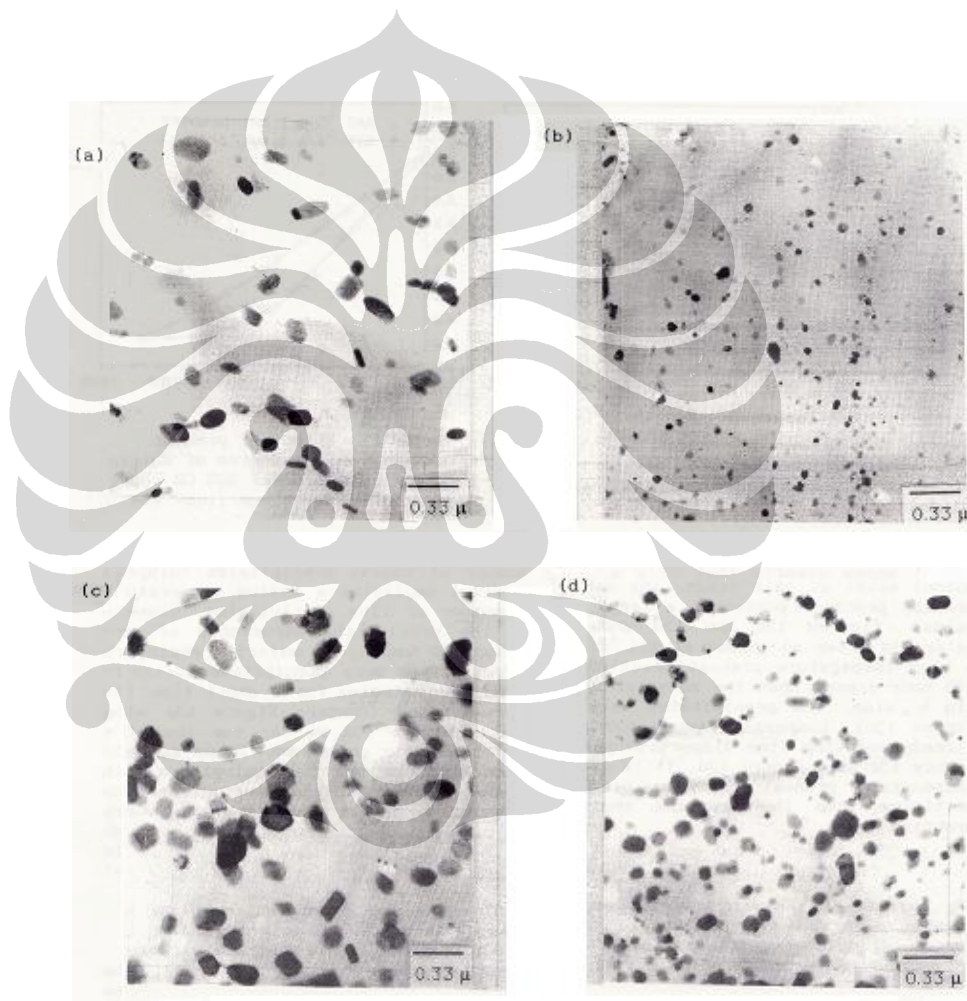
2.1.6 Bentuk Struktur Mikro Paduan Al – Mn - Mg

Gambar 2.4 memperlihatkan struktur mikro paduan aluminium seri 3xxx (Al – Mn – Mg) setelah pengerolan dingin 70% dan 90% dengan perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas yang dilanjutkan dengan aniling 450° C selama 1800 detik. Dimana terjadi deformasi yang berbeda, dengan perlakuan panas partikel-partikel menjadi lebih halus dibandingkan dengan tanpa perlakuan panas.



Gambar 2.4 Struktur Mikro Penampang Melintang Lembaran Paduan Al-Mn-Mg (a) Hasil Pengerolan Dingin 70% Dilanjutkan Aniling 450° C, 1800 detik, (b) *Hot Treatment* dan Pengerolan Dingin 70% Dilanjutkan Aniling 1800 detik, (c) Pengerolan Dingin 90% Dilanjutkan Aniling 450° C, (d) *Hot Treatment* dan Pengerolan Dingin 90% Dilanjutkan Aniling 450° C, 1800 detik (Jiantao, 2006)

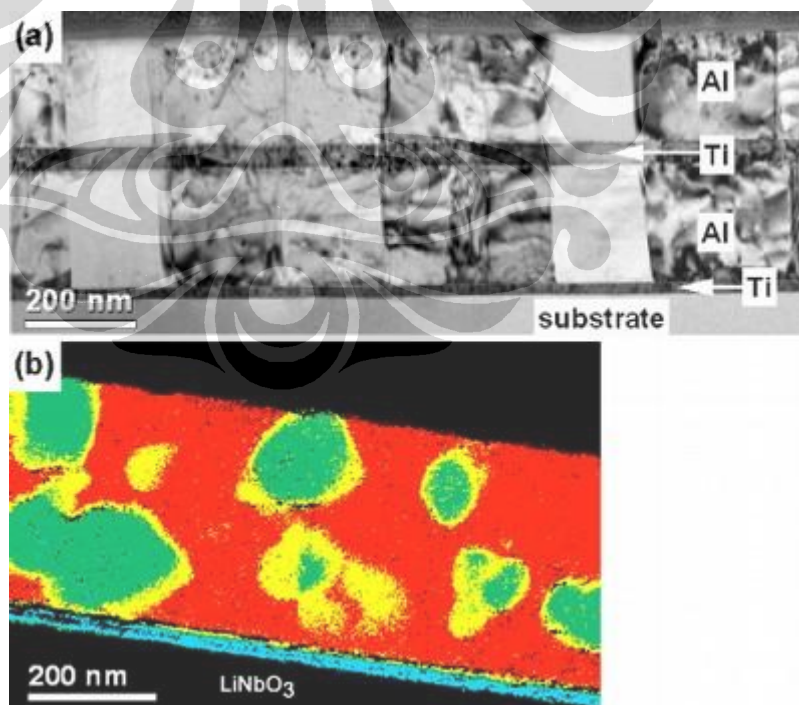
Gambar 2.5 memperlihatkan struktur presipitasi lembaran paduan aluminium AA3004 dengan penipisan 80%, dimana perlakuan panas berpengaruh terhadap perubahan presipitasi. Setelah dilakukan pemanasan terjadi perubahan presipitasi, baik dalam hal ukuran, jumlah maupun distribusinya. Dengan pemanasan pada temperatur 607°C selama 6 jam bentuk presipitasi lebih besar dengan jumlah yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan pemanasan 440°C selama 1 jam. Hal ini berarti semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu pemanasan mengakibatkan ukuran presipitasi semakin besar.



Gambar 2.5 Struktur Presipitasi Lembaran Paduan Aluminium AA3004 Dengan Penipisan 80% : (a) dan (c) Sampel Setelah Pemanasan 607°C Selama 6 Jam, (b) dan (d) Sampel Setelah Pemanasan 440°C Selama 1 Jam (Li *et al.*, 1993)

2.1.7 Bentuk Struktur Mikro Paduan Al – Ti

Penelitian tentang pengaruh perlakuan panas (*heat treatment*) pada Al – Ti telah dilakukan oleh M. Hofmann, T. Gemming, S. Menzel, K. Wetzig dengan menggunakan *transmission electron microscope (TEM)*, dimana tidak ditemukan reaksi antara aluminium dan titanium sebelum dilakukan pemanasan (Gambar 2.6). Akan tetapi setelah pemanasan 450°C selama 5 jam ditemukan terjadinya logam titanium larut secara sempurna pada aluminium. Dengan larutnya titanium tersebut terjadi transformasi struktur mikro dari butiran-butiran (*grains*) yang berbentuk persegi (*rectangular*) menjadi bulat (*globular*) dari fasa intermetalik (*intermetallic phase*) Al_3Ti ke dalam matrik aluminium. Dimana dapat dilihat pada sekeliling batas butir Al_3Ti yang berwarna hijau terdapat warna kuning yang mengindikasikan lebih tingginya kandungan aluminium dan melahirkan batas-batas butir. Dapat dilihat pula bahwa dengan terbentuknya fasa intermetalik Al_3Ti langsung dari deposit lapisan aluminium di atas dan titanium di bawahnya (Zeren dan Karakulak, 2009).



Gambar 2.6 Hasil Analisis TEM Terhadap Paduan Al-Ti (Zeren dan Karakulak, 2009)

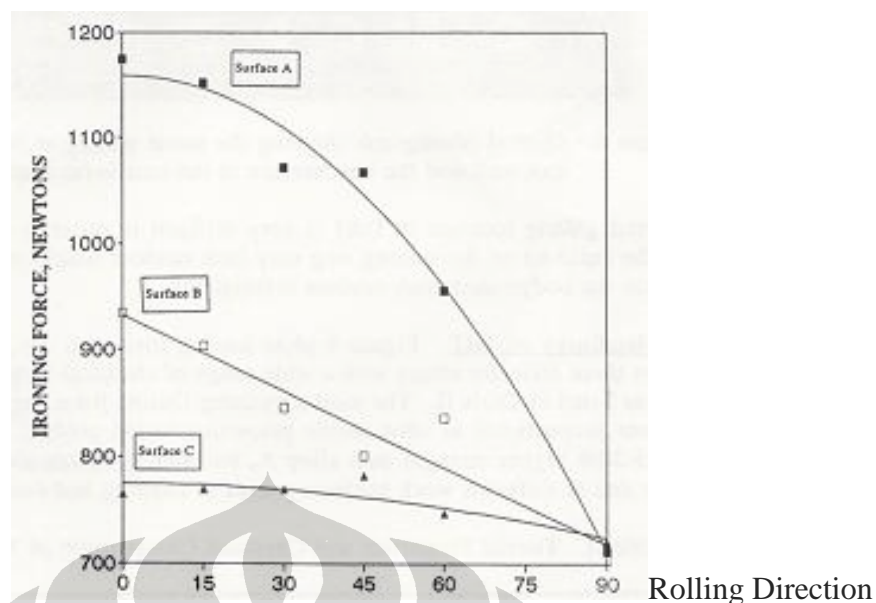
2.1.8 Bentuk Permukaan Lembaran Paduan Aluminium AA3104

Untuk memperbaiki pelumasan pada permukaan aluminium, bentuk struktur mikro yang diinginkan bisa dicapai dengan pengerolan akhir menggunakan bentuk permukaan yang sesuai, misalnya permukaan yang berbentuk titik-titik (*stochastic surfaces*), atau permukaan rata (*mill finish surfaces*). Ciri khas bentuk permukaan lembaran aluminium untuk badan kaleng dengan proses *drawn wall ironing* ditunjukkan pada Gambar 2.7, yaitu berbentuk *mill finish* yang membentuk alur mengikuti arah pengerolan (Sun, 1993).

Gambar 2.8 memperlihatkan pengaruh kekasaran permukaan lembaran aluminium terhadap tenaga yang dibutuhkan untuk proses *drawn wall ironing*. Dimana, semakin tinggi tingkat kekasaran permukaan lembaran aluminium dibutuhkan tenaga yang lebih tinggi (Sun, 1993). Jadi bentuk permukaan lembaran harus dikembangkan sehalus mungkin agar tenaga yang dibutuhkan adalah minimum, sehingga tingkat keausan *tooling* bisa dikurangi dan pada akhirnya akan memperbaiki tingkat kegagalan dalam proses.



Gambar 2.7 Ciri Khas Permukaan Lembaran Aluminium Untuk Badan Kaleng (Sun, 1993)



Gambar 2.8 Tenaga Yang Dibutuhkan Pada Proses *Drawn Wall Ironing* Terhadap Kekasaran Permukaan Yang Berbeda, Permukaan a = 3,5 μm , b = 2,5 μm dan c = 1,5 μm (Sun, 1993)

2.1.9 Paduan Aluminium Untuk Badan Kaleng Minuman Dengan Proses *Drawn Wall Ironing*

Paduan Aluminium yang biasa digunakan untuk badan kaleng minuman adalah paduan aluminium AA3104 dengan kandungan unsur seperti yang tertera pada Tabel 2.5. Adapun material yang digunakan dalam penelitian ini adalah berdasarkan paduan aluminium AA3104 dengan penambahan titanium yang bervariasi. Karakteristik unsur-unsur yang dipadukan untuk bahan baku badan kaleng minuman dapat dilihat pada Tabel 2.6. Titanium bersifat membatasi pertumbuhan dari unsur-unsur terlarut pada aluminium dan pembentukan butir baru (Mark dan David, 1999). Dengan demikian, titanium memiliki efek penghalusan butir pada paduan aluminium (Kashyap dan Chandrashekar, 2001).

Gambar 2.9 memperlihatkan diagram fasa Al-Si, Al-Cu, Al-Fe, Al-Mn, Al-Mg, dan Al-Ti. Dimana apabila diperhatikan bahwa untuk komposisi paduan aluminium seperti yang tertera pada Tabel 2.2 setelah ditambahkan titanium dibawah 1 % (dalam % berat), maka temperatur yang dibutuhkan untuk mencair secara sempurna adalah 818°C. Temperatur tertinggi untuk mencair sempurna adalah pada paduan Al-Ti, hal ini sesuai dengan titik lelehnya seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3. Jadi dengan ditambahkan titanium pada paduan

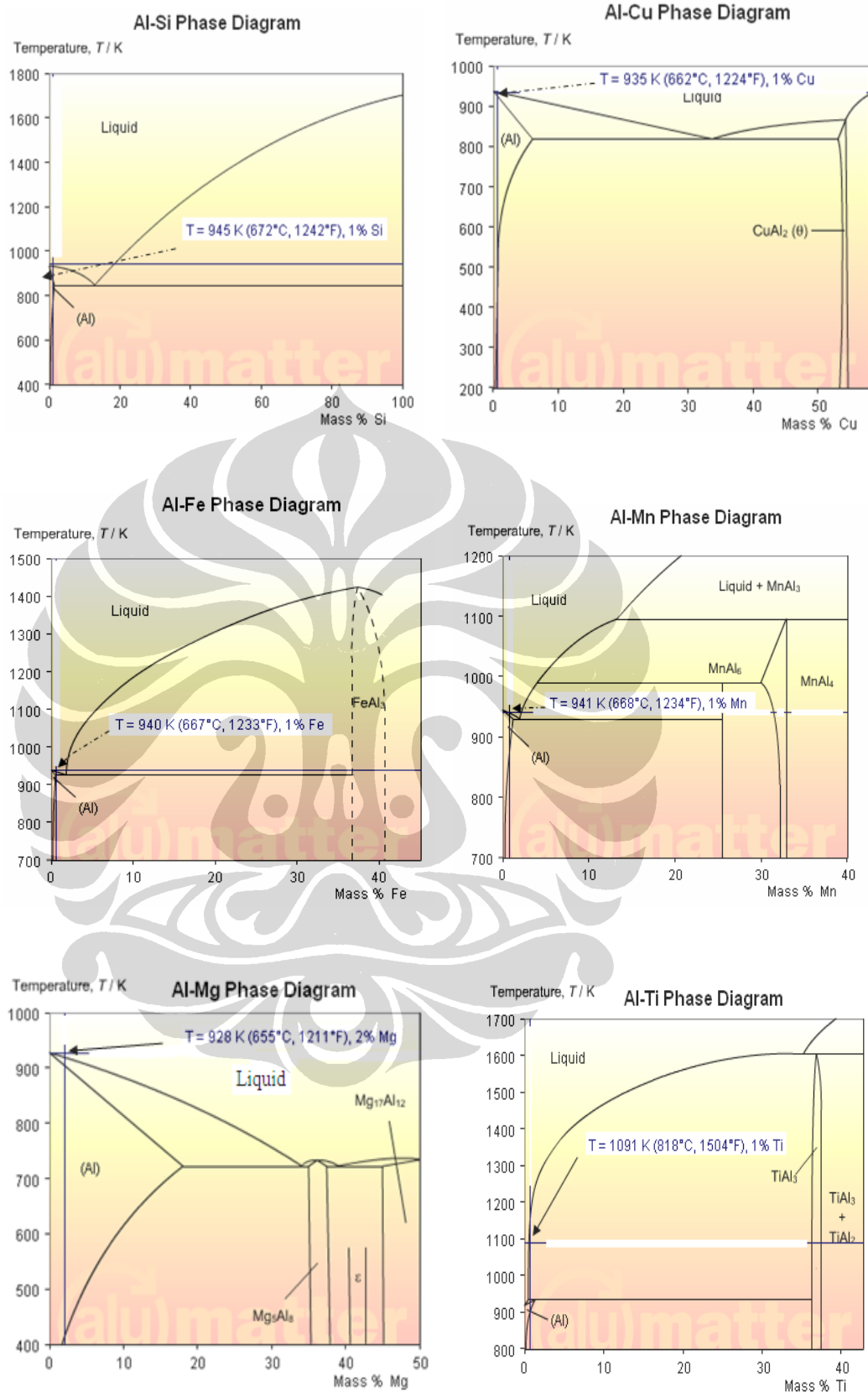
aluminium membutuhkan lebih banyak energi untuk proses peleburannya, akan tetapi dalam penelitian ini diabaikan.

Tabel 2.5 Standar Kandungan Komposisi Unsur-Unsur Paduan Aluminium AA3104 (Alcoa, 2007)

Unsur	AA3104
Si	0,00 – 0,60
Cu	0,05 – 0,25
Fe	0,00 – 0,80
Mn	0,80 – 1,40
Mg	0,80 – 1,30
Cr	0,000 – 0,06
Zn	0,00 – 0,25
Al	Sisanya

Tabel 2.6 Karakteristik Unsur-Unsur Yang Dipadukan Dalam Paduan Aluminium Sebagai Bahan Baku Badan Kaleng Minuman (Callister, 1997)

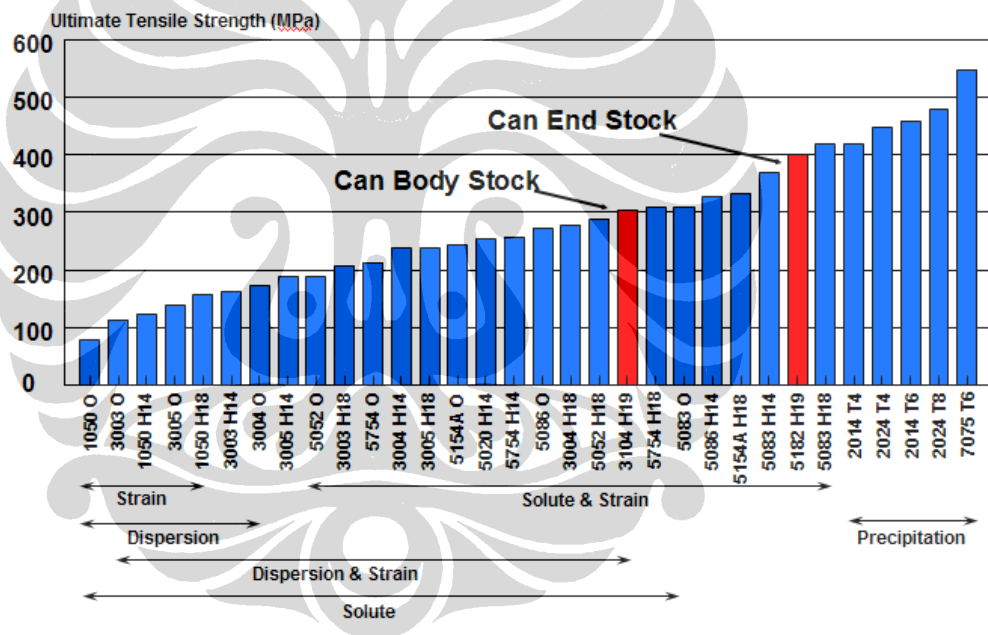
Unsur	No. Atom	Berat Atom	Densiti, 20°C (g/cm ³)	Struktur Kristal, 20°C	Jari – Jari Atom (nm)	Titik Leleh (°C)
Al	13	26.98	2.71	FCC	0.143	660.4
Si	14	28.09	2.33	Komplek Kubus	0.118	1410
Fe	26	55.85	7.87	BCC	0.124	1538
Cu	29	63.55	8.94	FCC	0.128	1084
Mn	25	54.94	7.44	Kubus	0.112	1244
Mg	12	24.31	1.74	HCP	0.160	649
Zn	30	65.39	7.13	HCP	0.133	420
Ti	22	47.88	4.51	HCP	0.145	1668



Gambar 2.9 Diagram Fasa Al-Si, Al-Cu, Al-Fe, Al-Mn, Al-Mg, dan Al-Ti (Aluminum Matter, 2009)

2.1.10 Pengerasan Paduan Aluminium AA3104

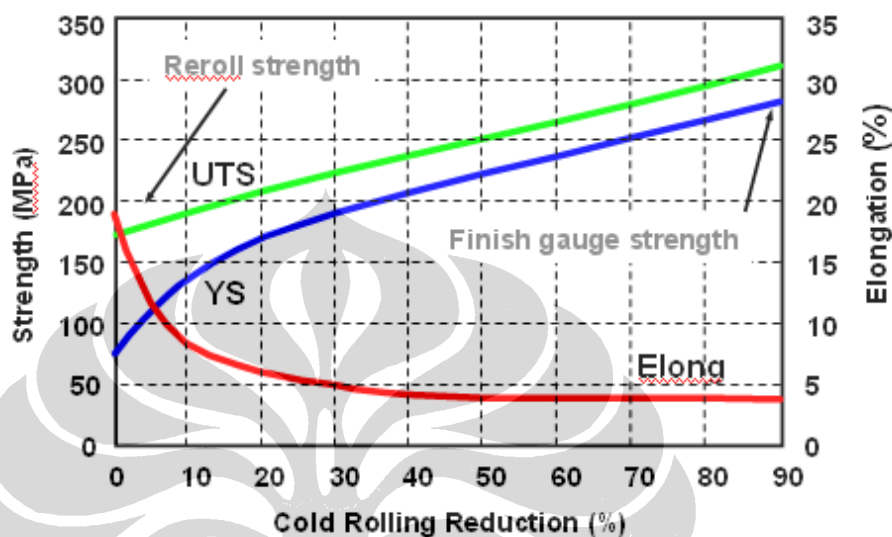
Berdasarkan Gambar 2.10 pengerasan paduan aluminium terjadi dengan beberapa cara, yaitu: untuk mencapai kekuatan tarik sampai dengan 150 MPa bisa dilakukan dengan pengerasan pengerolan dingin (*strain hardening*), sampai 300 MPa dengan pengerolan dingin dan dispersi, sampai 400 MPa dengan penambahan material lain dan pengerolan dingin, dan untuk diatas 400 MPa dilakukan dengan presipitasi. Dalam hal bahan baku aluminium untuk badan kemasan kaleng paduan aluminium AA3104 dengan kekuatan tarik yang diinginkan diatas 300 MPa, maka di sini dilakukan dengan cara pencampuran unsur-unsur lain dan pengerolan dingin (*solute and strain hardening*).



Gambar 2.10 Grafik Kombinasi Mekanisme Pengerasan Paduan Aluminium (Alcan, 2004)

Lembaran aluminium untuk badan kaleng dengan proses *deep drawing* yang dilanjutkan dengan *wall ironing* diperlukan material yang mempunyai sifat mampu bentuk yang baik. Selain itu diperlukan pula material yang memiliki nilai anisotropi mendekati satu untuk menghindari terjadinya pengupingan (*earing*) yang berlebihan. Lembaran aluminium dengan mampu bentuk yang kecil akan mengakibatkan tingginya tingkat kegagalan proses, dan material yang memiliki

pengupingan yang tinggi akan menyebabkan tidak meratanya ketinggian kaleng sehingga tidak tercapainya ketinggian kaleng setelah dipotong pada bagian atasnya.



Gambar 2.11 Grafik Pengaruh Persentase Pengerolan Dingin Terhadap Kekuatan dan Perpanjangan Paduan Aluminium (Alcan, 2004)

Gambar 2.11 memperlihatkan hubungan antara besarnya persentase penipisan selama proses pengerolan dingin terhadap kekuatan (*strength*) yang dapat diukur dengan parameter kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strength – UTS*) dan kekuatan luluh (*Yield Strength – YS*) serta regangan (*elongation*). Semakin besar persentase penipisan pada pengerolan dingin maka semakin besar pula kenaikan kekuatan tarik dan kekuatan luluh, akan tetapi sifat perpanjangannya semakin menurun. Selama pengerolan dingin temperatur bisa mencapai 180°C . Walaupun demikian, proses ini disebut sebagai pengerolan dingin, karena temperatur tersebut masih dibawah suhu rekristalisasi. Suhu rekristalisasi aluminium adalah 350°C (Vlack, 1995).

Besarnya penipisan paduan aluminium untuk bahan baku badan kemasan kaleng (*CBS – Can Body Stock*) adalah sekitar 88% sampai mendapatkan ketebalan yang diinginkan, yaitu dari 2,30 mm menjadi 0,270 mm.

Gambar 2.12 menunjukkan urutan proses pembentukan badan kaleng dengan proses *drawn wall ironing*, dimana diperlukan kekerasan dan keuletan

material pada proses tersebut (Marshall, 2002). Gambar 2.13 menunjukkan bentuk cup dengan *earing* nya, dimana diperlukan material dengan nilai anisotropi mendekati 1 agar tidak terjadi *earing* yang berlebihan. *Earing* yang besar akan mengakibatkan terjadinya perbedaan tinggi yang besar pula pada sekeliling badan kaleng setelah dibentuk dengan proses *drawn wall ironing* (Marshall, 2002).



Gambar 2.12 Urutan Proses Pembentukan Kaleng (Marshall, 2002)



Gambar 2.13 Hubungan Anisotropi dan *Earing* (Marshall, 2002)

2.2 Sifat-sifat Mekanik Logam Lembaran

2.2.1 Mekanisme Deformasi Logam

Perubahan bentuk dapat dipisahkan menjadi dua macam yaitu, deformasi elastis dan deformasi plastis (Adnyana, 1994). Proses pembentukan logam melibatkan deformasi plastis (permanen) yang tersisa pada logam setelah gaya

yang menyebabkannya dihilangkan (Dieter, 1988). Deformasi elastis adalah perubahan bentuk yang terjadi bila ada gaya yang bekerja, serta akan hilang bila bebannya diiadakan. Apabila suatu logam dibebani sampai ke arah plastis, maka perubahan bentuk yang saat itu terjadi adalah gabungan antara deformasi plastis dan deformasi elastis, gabungan ini disebut deformasi total. Apabila beban diiadakan, maka deformasi elastis akan hilang pula, sehingga perubahan bentuk yang ada hanya deformasi plastis saja.

2.2.2 Mekanisme Deformasi Secara Mikro

Secara mikro, perubahan bentuk elastis maupun plastis disebabkan oleh bergesernya kedudukan atom-atom dari tempatnya semula. Pada deformasi elastis adanya tegangan akan menggeser atom-atom ketempat kedudukannya yang baru, dan atom-atom tersebut akan kembali ketempatnya semula apabila tegangan diiadakan. Jarak pergeserannya relatif kecil, karena itulah deformasi elastis biasanya juga relatif kecil, yaitu kurang dari 0,5% (Adnyana, 1994).

Pada deformasi plastis, atom-atom yang bergeser menempati kedudukan baru yang stabil. Jadi meskipun beban dihilangkan, atom-atom tersebut tetap berada pada kedudukannya yang baru. Secara mikroskopis hal ini berarti pula bahwa perubahan bentuknya adalah permanen. Tempat kedudukan baru yang stabil tersebut disebabkan karena memang tempat tersebut adalah posisi atom pada sel satuannya.

2.2.3 Mekanisme *Slip*

Atom-atom logam tersusun secara teratur mengikuti pola geometris yang tertentu. Pola geometris yang terkecil dan yang sama sekali berulang (*repetitive*) inilah yang disebut sel satuan. Apabila ada tegangan geser yang cukup besar, maka sederetan atom akan bergeser dan berpindah serta menempati posisinya yang baru. Pergeseran atom berarti ada pemutusan ikatan atom, dari sini dapat diperkirakan bahwa bidang yang mudah bergeser adalah yang jaraknya satu sama lain berjauhan. Bidang-bidang atom yang jaraknya berjauhan adalah yang kerapatan atomnya tinggi. Jadi bidang *slip* adalah bidang yang rapat atomnya tinggi. Pada sel satuan fcc seperti halnya aluminium, bidang yang paling rapat

susunan atomnya adalah bidang {111}, dan untuk sel satuan bcc bidang yang paling padat adalah {110}, meskipun bidang ini bukanlah susunan rapat (*closed packed*). Pergeseran atom-atom ini mempunyai arah, yang selanjutnya disebut sebagai arah *slip*. Arah *slip* yang mudah terjadi adalah arah yang padat.

2.2.4 Hubungan Tegangan dan Regangan

Untuk mengetahui batas tegangan maksimum yang boleh diberikan pada proses deformasi, perlu dilakukan proses pengujian tarik. Dari hasil uji tarik maka akan diperoleh kurva tegangan-regangan (*engineering stress-strain curve*) (Dieter, 1988). Parameter-parameter yang diperoleh dari kurva tegangan-regangan, antara lain adalah kekuatan luluh (*yield strength*), kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) dan regangan (*elongation*).

2.2.5 Anisotropi Pada Logam Lembaran

Pada umumnya, lembaran logam bersifat anisotropi, artinya memiliki sifat yang berbeda pada arah yang berbeda (Gambar 2.14). Penyebab sifat anisotropi ini adalah terbentuknya orientasi pilihan (*preferred orientation / crystallographic texture*) akibat suatu proses deformasi. Pada saat pengerolan, kristal logam polikristalin cenderung berputar kearah tertentu. Sifat ini terlihat pada bervariasinya nilai modulus elastis, tegangan luluh, regangan dan berbagai karakteristik lain terhadap arah pengujian (Medraj, 2004).

Lembaran logam memiliki sifat anisotropi pada aliran plastis dari berbagai arah. Sifat ini dapat dibedakan menjadi anisotropi normal (Gambar 2.15) dan anisotropi planar (Gambar 2.16). Anisotropi normal (R) oleh Lankford (Ghosh dkk, 1983) didefinisikan sebagai perbandingan regangan sebenarnya pada arah lebar dan tebal pada daerah regangan merata selama pengujian tarik uniaksial. Sedangkan anisotropi planar (ΔR) adalah perbedaan sifat anisotropi normal terhadap arah orientasi pada bidang lembaran. Gambar 2.17 dan 2.18 menunjukkan pengaruh anisotropi planar terhadap pengupingan yang terjadi pada proses penarikan dalam (*deep drawing*).

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_o}{w_i}}{\ln \frac{t_o}{t_i}} \quad (\text{Persamaan 2.1})$$

dimana w_o , t_o , dan l_o adalah lebar, tebal, dan panjang sampel mula-mula,
 w_t , t_t , dan l_t adalah lebar, tebal, dan panjang akhir.

Karena pengukuran pada arah tebal kurang akurat yang dapat disebabkan oleh kekasaran permukaan, maka dengan asumsi volume konstan, nilai R dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini (Dieter, 1988), dengan asumsi volume konstan:

$$R = \frac{\ln \frac{w_o}{w_t}}{\ln \frac{w_t l_t}{w_o l_o}} \quad (\text{Persamaan 2.2})$$

Pengukuran nilai R dari suatu lembaran logam dilakukan pada arah 0° , 45° , 90° dari arah pengerolan. Nilai rata-ratanya :

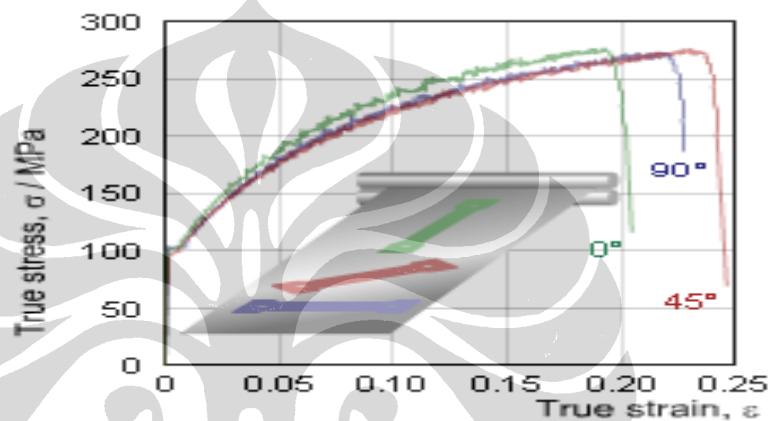
$$\bar{R} = \frac{R_o + 2 R_{45} + R_{90}}{4} \quad (\text{Persamaan 2.3})$$

Sedangkan koefisien anisotropi planar (ΔR) dihitung dengan rumus (Harris, 1983):

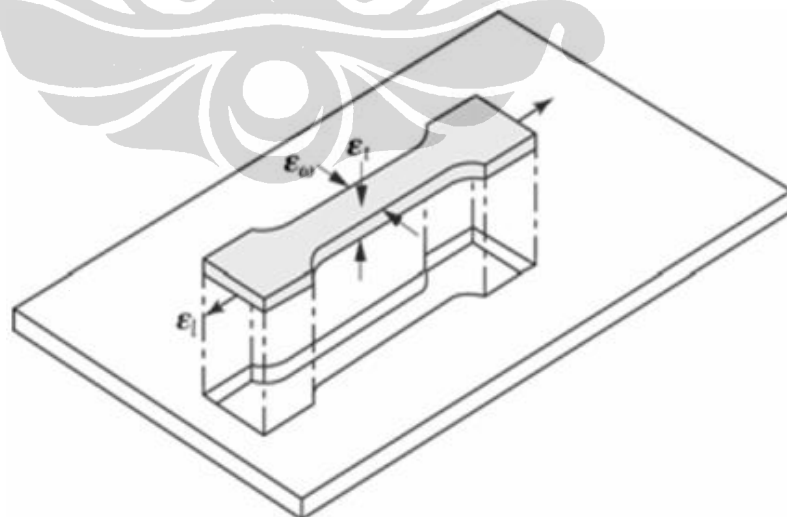
$$\Delta R = \frac{R_o - 2 R_{45} + R_{90}}{2} \quad (\text{Persamaan 2.4})$$

Nilai \bar{R} merupakan ukuran ketahanan bahan terhadap penipisan. Nilai \bar{R} berhubungan dengan kinerja penarikan dalam (*deep drawing*) lembaran karena nilai ini merefleksikan perbedaan kemampuan dinding tepi mangkuk (*cup*) menerima beban yang diperlukan untuk menekan lembaran (*blank*) selama proses penarikan dalam (*deep drawing*). Nilai ΔR mempengaruhi terjadinya pengupingan (*earing*) dimana jika $\Delta R > 0$ maka pengupingan terjadi pada arah 0° dan 90° ,

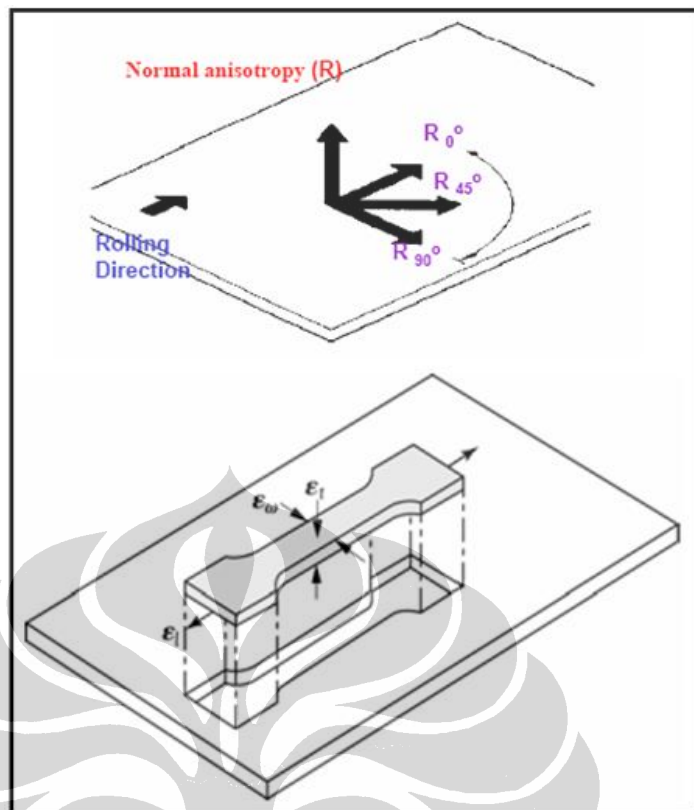
sedangkan jika $\Delta R < 0$ pengupingan terjadi pada arah 45° . Untuk proses *deep drawing* dibutuhkan bahan yang memiliki harga $\bar{R} > 1$ dan ΔR mendekati 0. Nilai \bar{R} yang tinggi menunjukkan adanya pengerasan tekstur (*texture hardening*). Logam berstruktur fcc biasanya memiliki nilai R yang mendekati 1, sedangkan logam yang memiliki struktur heksagonal dapat memiliki harga R yang cukup tinggi (Medraj, 2004).



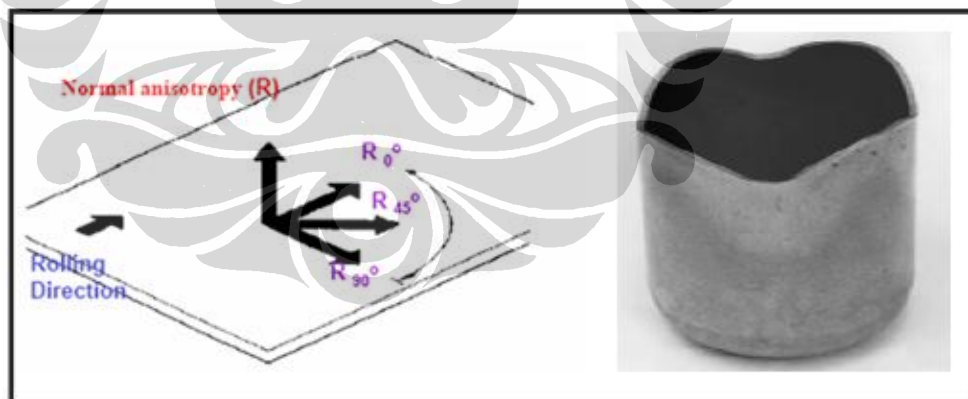
Gambar 2.14 Sifat Mekanik Yang Berbeda Pada Arah Yang Berbeda (Medraj, 2004)



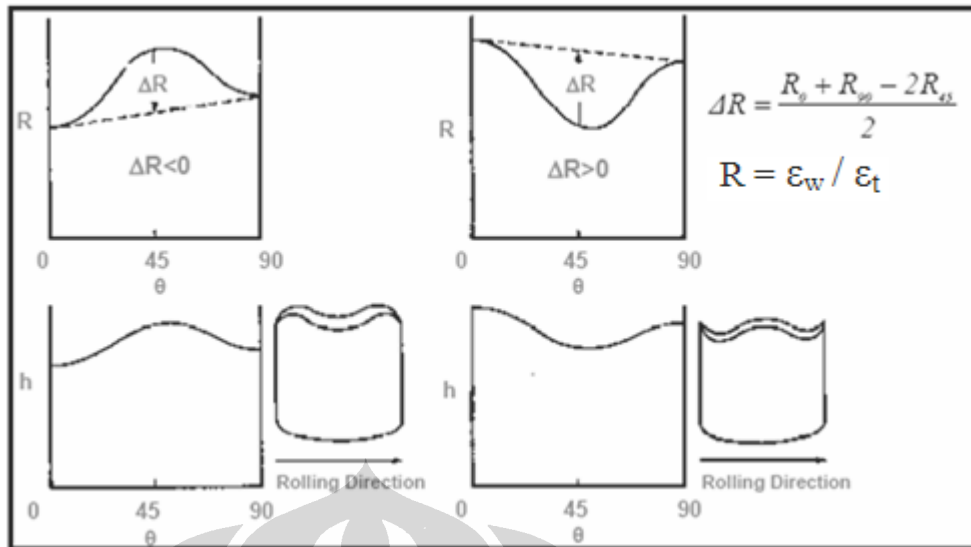
Gambar 2.15 Sketsa Anisotropi Normal (Medraj, 2004)



Gambar 2.16 Sketsa Anisotropi Normal Rata-Rata (Medraj, 2004)



Gambar 2.17 Skematik Anisotropi Planar dan Kecendrungan Pengupingan (Medraj, 2004)



Gambar 2.18 Pengaruh Anisotropi Planar Terhadap Pengupingan (Medraj, 2004)

2.2.6 Proses Pembentukan Logam Lembaran

Ada empat jenis proses pembentukan logam lembaran yaitu: *stretching*, *bending*, *deep drawing* dan *wall ironing* (Medraj, 2004).

2.2.6.1 Pembentukan Logam Lembaran Dengan *Stretching*

Stretching adalah proses pembentukan yang menggunakan gaya tarik utama sedemikian rupa sehingga bahan tertarik pada perkakas atau blok pembentuk. *Spring back* yang terjadi kecil karena deformasi yang terjadi relatif seragam. Pada proses ini, batas pembentukannya adalah terjadinya penyempitan pada lembaran.

2.2.6.2 Pembentukan Logam Lembaran Dengan *Bending*

Bending adalah proses pembentukan lembaran dengan cara ditekuk. Pada permukaan luar benda kerja akan mengalami tegangan tarik sedangkan permukaan dalam akan mengalami tegangan tekan, dan pada sumbu netralnya tidak mengalami regangan. Mampu bentuk material terhadap *bending* dapat dilihat dari perbandingan jari-jari penekukan terhadap tebal (R_b/t). Semakin kecil jari-jari penekukan yang dapat dicapai oleh lembaran tanpa terjadi kegagalan, semakin baik mampu bentuk lembaran. Pada proses *bending* ini rawan terhadap *spring back*.

2.2.6.3 Pembentukan Logam Lembaran Dengan Penarikan Dalam (*Deep Drawing*)

Deep Drawing adalah proses pembentukan lembaran dengan cara menekan lembaran (*blank*) masuk ke dalam cetakan mengikuti gerakan penekan. Kemampuan bahan untuk diproses *deep drawing* dinyatakan dengan *limiting drawing ratio* ($LDR = D_{\max}/d$), dimana D_{\max} adalah diameter *blank* maksimum yang dapat dibentuk tanpa gagal menjadi sebuah mangkok, dan d adalah diameter penekan (*punch*).

Gambar 2.19 memperlihatkan proses *deep drawing* yang dimulai dari pemotongan material menjadi *blank*, lalu dilanjutkan penekanan oleh *punch* sampai menghasilkan bentuk seperti mangkuk (*cup*). Selama penekanan, *blank* ditahan oleh *blank holder* agar tidak terjadi pengerutan (Medraj, 2004). Hasil pembentukan yang berupa mangkuk (*cup*) mempunyai ketebalan yang hampir sama dengan ketebalan lembaran awal. Pada proses ini, lembaran mengalami tiga jenis deformasi yang berbeda, tergantung posisinya. Bagian *blank* yang terletak di bawah penekan akan mengikuti bentuk penekan dan mengalami penipisan karena tegangan tarik biaksial akibat gerakan penekan. Bagian yang terletak di tepi *blank* akan mengalami penarikan arah radial ke arah mulut cetakan dan mengalami pengurangan diameter. Bagian ini mengalami tegangan tarik arah radial dan tegangan tekan pada arah keliling yang akan menyebabkan lembaran bertambah tebal dan mungkin membentuk kerutan (*wrinkling*). Tetapi saat lembaran melalui jari-jari cetakan, terjadi pelengkungan dan pelurusan kembali yang akan menyebabkan penipisan sebagai kompensasi peningkatan ketebalan tadi. Di antara kedua bagian tadi, yaitu dinding mangkuk tidak terjadi pelengkungan dan hanya mengalami tegangan tarik selama proses *deep drawing* (Medraj, 2004).

Secara umum langkah-langkah jalannya proses pembentukan *cup* adalah seperti berikut;

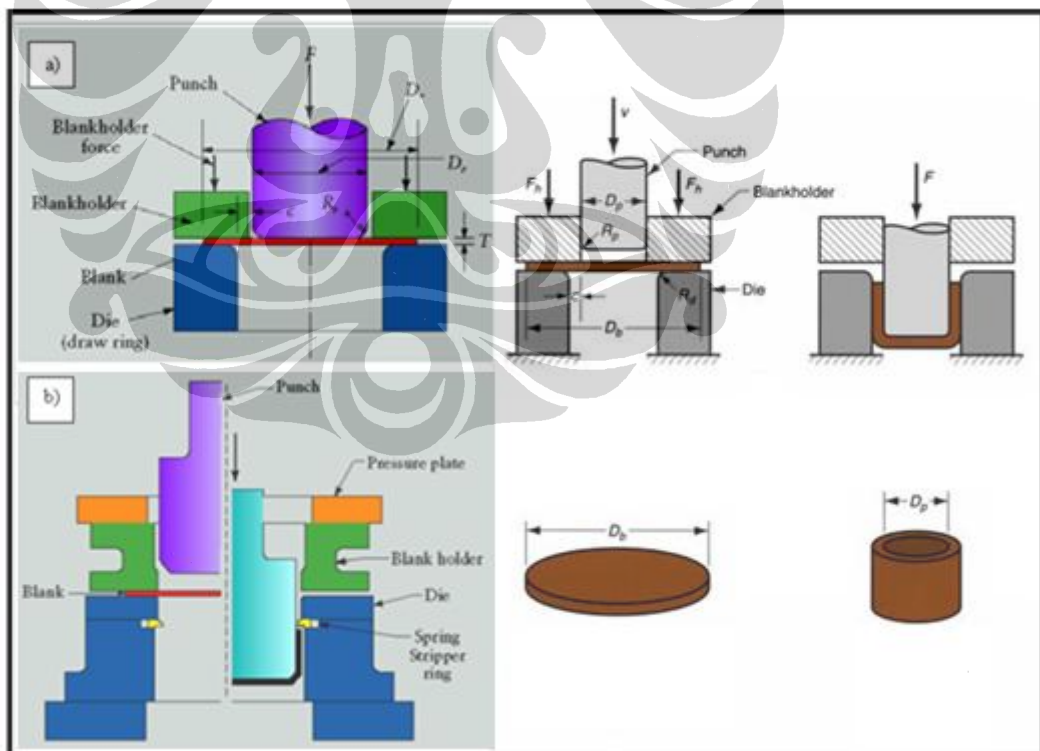
- Pemotongan lembaran aluminium menjadi *blank*.
- *Blank* ditahan oleh *blank holder*.
- Kontak awal antara *punch* dengan lembaran aluminium.
- Penekanan oleh *punch* mengikuti bentuk *die*.

- Pelurusan dinding *cup* yang menimbulkan gesekan dan tekanan pada material aluminium.

- Hasil akhir berupa *cup*.

Parameter-parameter yang mempengaruhi proses *deep drawing* diantaranya adalah (Medraj, 2004);

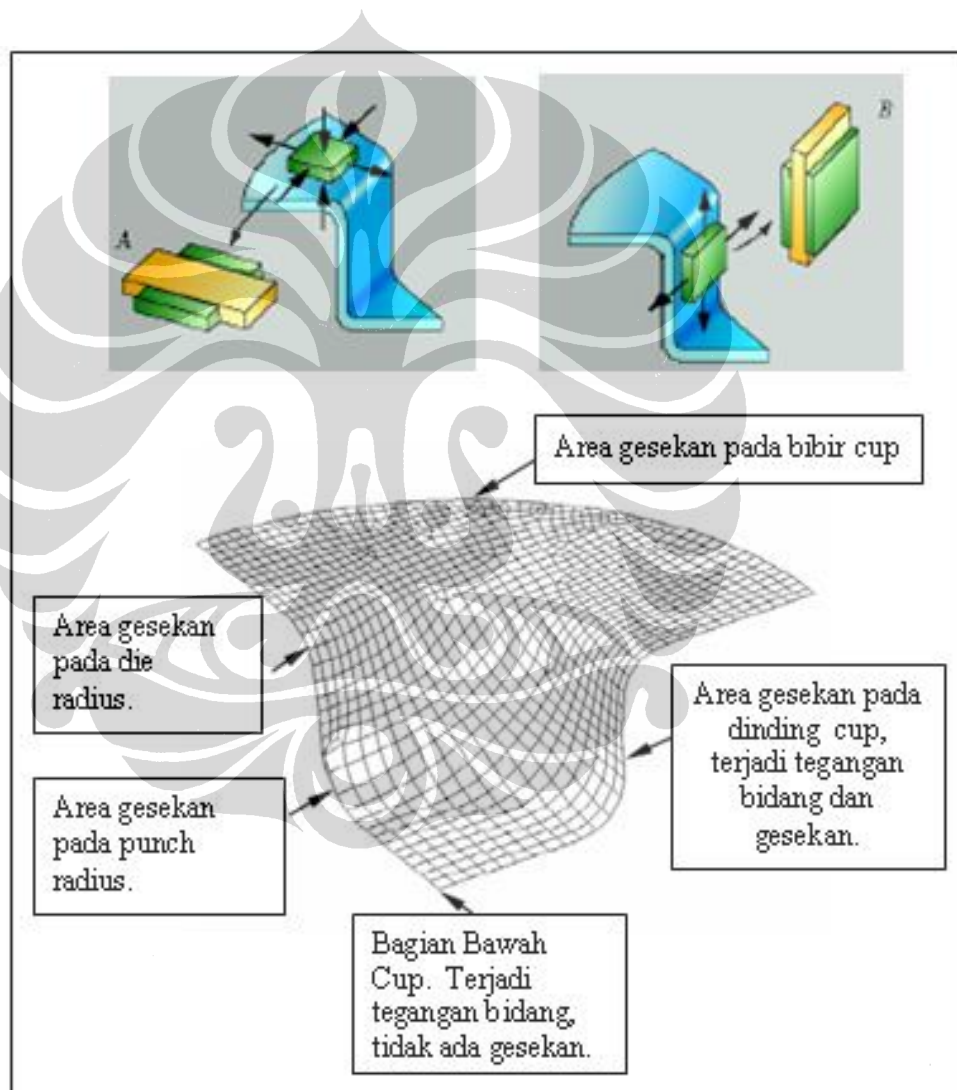
- Sifat mekanik lembaran aluminium.
- Rasio *blank diameter* terhadap *punch diameter*.
- Ketebalan lembaran.
- Jarak antara *punch* dan *die*, ketebalan material ditambah 10%.
- Radius sudut *punch* dan *die*.
- Besarnya tekanan *blank holder*.
- Lubrikasi yang berhubungan dengan gesekan.
- Kecepatan *punch*.



Gambar 2.19 Sketsa Proses *Deep Drawing* (Medraj, 2004)

Skema deformasi dapat dilihat pada Gambar 2.20, dimana terjadi gesekan pada bibir *cup*, *die radius*, dinding dan *punch radius*. Pada bagian bawah tidak terjadi gesekan, hanya terjadi tegangan bidang. Adapun kerusakan yang mungkin terjadi pada waktu proses pembentukan *cup* seperti tersebut diatas adalah disebabkan oleh *die radius* dan *punch radius* yang terlalu kecil.

Selama proses penarikan dalam (*deep drawing*) terjadi tegangan diseluruh dinding *cup* yang bisa mengakibatkan pengerutan pada bibir *cup*.



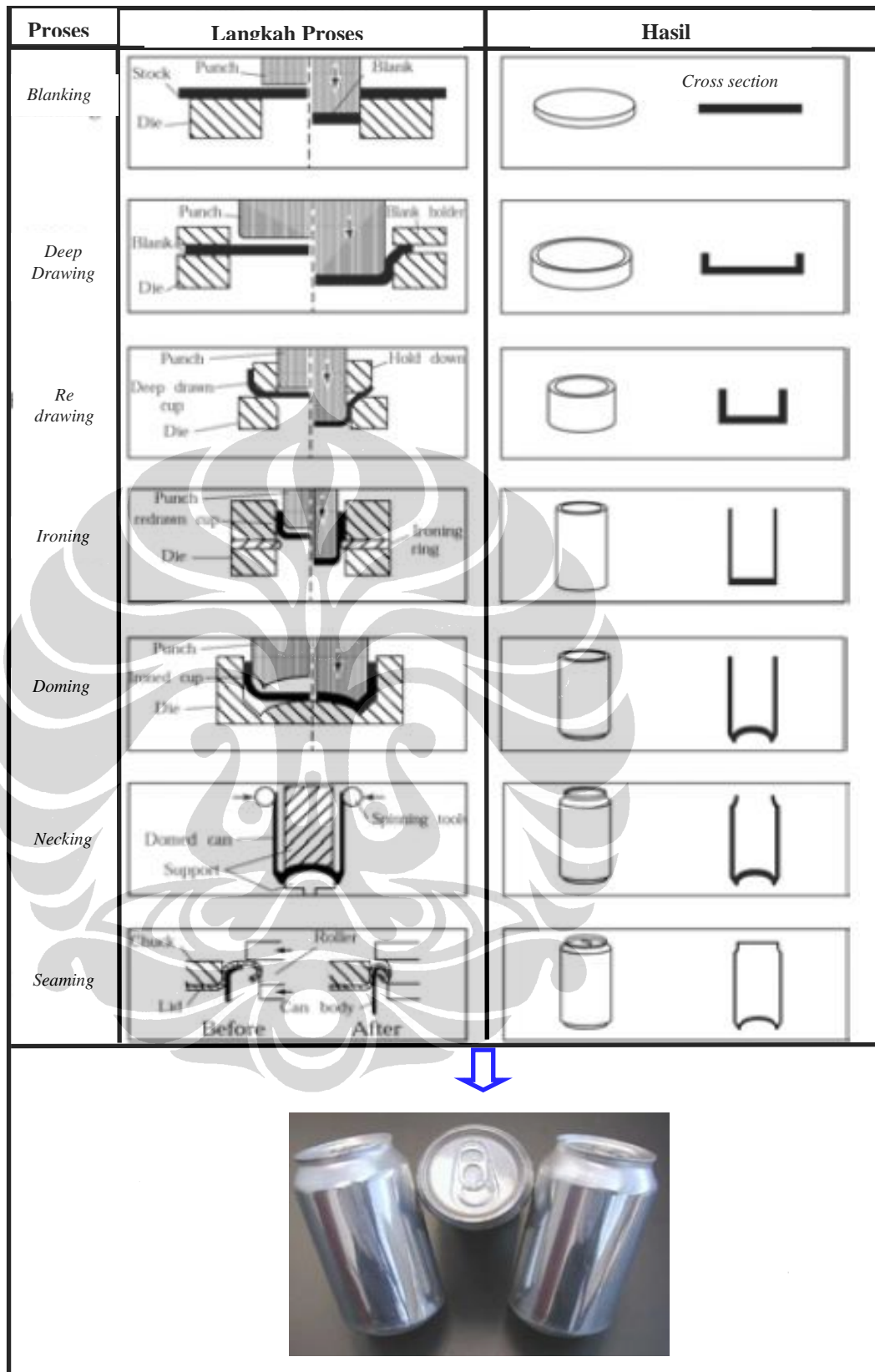
Gambar 2.20 Sketsa Deformasi Yang Terjadi Saat Proses *Deep Drawing* (Medraj, 2004)

2.2.6.4 Pembentukan Logam Lembaran Dengan Penipisan Dinding (*Drawn Wall Ironing*)

Proses *drawn wall ironing* biasanya adalah lanjutan dari *deep drawing*. Pada proses *deep drawing* tidak terjadi penipisan material, hanya terjadi pengecilan diameter dan perpanjangan. Sedangkan pada proses *wall ironing*, selain perpanjangan juga terjadi penipisan pada bagian sekeliling dindingnya. Adapun terjadinya penipisan tersebut diatur oleh jarak antara *punch* dengan *ring*. Untuk menghindari *stress* yang berlebihan agar tidak terjadi kegagalan proses, penipisan dilakukan secara bertahap dengan cara mengatur besarnya diameter *ring*.

Gambar 2.21 memperlihatkan langkah-langkah proses pembentukan kaleng minuman dengan proses *deep drawing* yang dilanjutkan dengan proses *wall ironing* yang disebut *drawn wall ironing (DWI)*. Prosesnya adalah meliputi; pemotongan lembaran menjadi *blank*, pembentukan *cup* dengan proses *deep* seperti yang telah dijelaskan diatas, dilanjutkan *redrawing*, dan *ironing* untuk menipiskan sekeliling dindingnya. Setelah itu dilanjutkan dengan pembentukan cekungan pada bagian bawah kaleng (*dome*). Sedangkan pembentukan leher dan bibir kaleng (*flange*) dilakukan pada proses di mesin lain (*necker-necker* dan *necker flanger*). Tujuan dari flange adalah untuk memudahkan proses penutupan di pelanggan setelah kaleng diisi dengan produk minuman (Medraj, 2004).

Proses penutupan adalah merupakan *assembling* antara badan kaleng dengan tutupnya memakai sistim tekukan ganda (*double seaming*). Oleh karena kaleng diisi dengan cairan minuman yang bertekanan (CO₂), maka proses penutupan ini sangat penting sekali untuk menghindari kebocoran.



Gambar 2.21 Sketsa Langkah-Langkah Proses Pembentukan Kaleng Minuman Dari Aluminium (Medraj, 2004)

2.3 Limiting Drawing Ratio (LDR)

Seperti disebutkan diatas, bahwa dalam pembuatan kaleng minuman, proses pembentukan yang dilakukan adalah *deep drawing* dan dilanjutkan dengan *wall ironing*. Kemampuan suatu material untuk diproses *deep drawing* akan sangat tergantung dari nilai LDR-nya (Hosford dan Caddell, 1983). Parameter-parameter yang mempengaruhi nilai LDR dapat dilihat pada skema Gambar 2.22.

Adapun hal-hal yang perlu diperhatikan saat melakukan percobaan untuk memperoleh nilai LDR adalah sebagai berikut :

1. Tekanan Penjepit (*Blank Holder Pressure*)

Besarnya tekanan yang dibutuhkan untuk menekan *blank* (*blank holder pressure*), P_b (Hosford dan Caddell, 1983) :

$$P_b = \frac{1}{400} \pi (D^2 - d^2) p^* \quad (\text{Persamaan 2.5})$$

$$P^* = 0,25 \left[\left(\frac{D}{d} - 1 \right)^2 + \frac{0,5 d}{100 s} \right] \sigma_{UTS} \quad (\text{Persamaan 2.6})$$

dimana D adalah diameter *blank*, d diameter penekan (mm), s tebal lembaran (mm), dan σ_{UTS} kekuatan tarik maksimum (kg/mm^2). Besarnya P_b harus cukup untuk menahan bahan yang akan masuk ke dalam cetakan tanpa terjadi kerutan (*wrinkling*) pada tepi atas *blank*, tetapi juga harus cukup kecil untuk memungkinkan bahan mengikuti gerakan penekan.

2. Tekanan Penekan (*Punch Pressure*)

Besarnya tekanan yang perlu diberikan untuk proses *deep drawing* (*punch pressure*), P_z (Hosford dan Caddell, 1983):

$$P_z = n \pi d s \sigma_{UTS} = \pi d_1 t_0 \sigma_f \ln (d_0/d_1) \quad (\text{Persamaan 2.7})$$

dimana n adalah rasio tegangan pada saat drawing terhadap tegangan tarik bahan, d diameter penekan (mm), s tebal lembaran (mm), dan σ_{UTS} kekuatan tarik maksimum (kg/mm^2).

3. Jari-jari Cetakan

Jari-jari cetakan yang kecil akan meningkatkan beban karena diperlukan gaya tambahan untuk penekukan. Juga akan terjadi penipisan berlebih di dekat dasar mangkuk. Kedua efek ini mempengaruhi LDR. Besar jari-jari cetakan yang dianjurkan adalah 8 – 10 kali tebal awal bahan (t_0) (Hosford dan Caddell, 1983).

4. Jari-jari Penekan

Jari-jari penekan hanya akan berpengaruh kecil terhadap beban penarikan, tetapi jari-jari yang kecil menyebabkan penipisan yang berlebihan didasar mangkuk. Jari-jari yang sangat besar ($\sim 50 t_0$) menyebabkan penekukan di daerah atas penekan. Jari-jari penekan yang dianjurkan adalah 6 – 8 t_0 (Hosford dan Caddell, 1983). Jika jarak antara *punch* dan *dies* terlalu kecil akan menyebabkan penipisan pada dinding mangkuk. Selain itu diperlukan beban yang lebih besar untuk mengatasi gesekan antara bahan dan cetakan. Pendekatan yang disederhanakan (Hosford dan Caddell, 1983):

$$w = t_0 \left(\frac{D}{d} \right)^{0,5} \quad (\text{Persamaan 2.8})$$

5. Tebal Lembaran

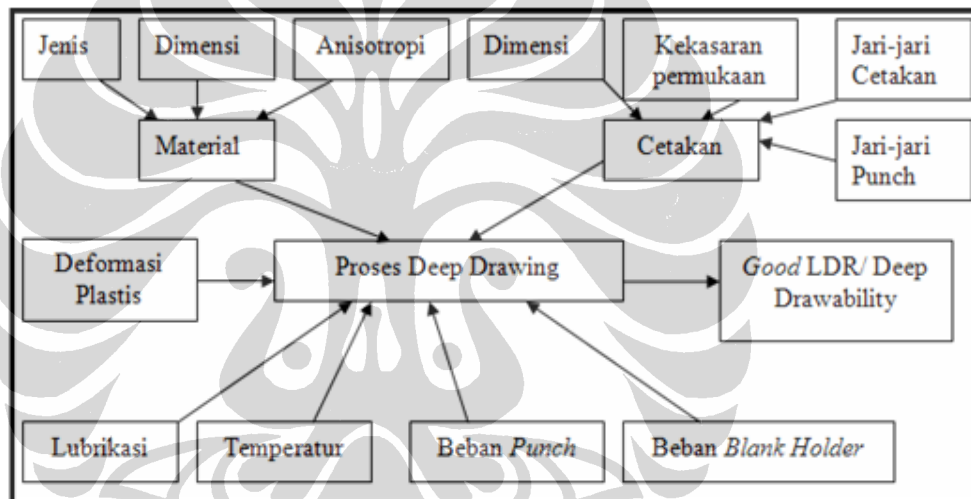
Dengan menurunnya tebal *blank*, maka pada beban penarikan yang sangat tinggi dapat menyebabkan kegagalan. LDR akan menurun dengan menurunnya perbandingan tebal *blank* terhadap diameter penekan. Efek ini dapat diperkecil dengan penambahan pelumasan (Hosford dan Caddell, 1983).

6. Pelumas

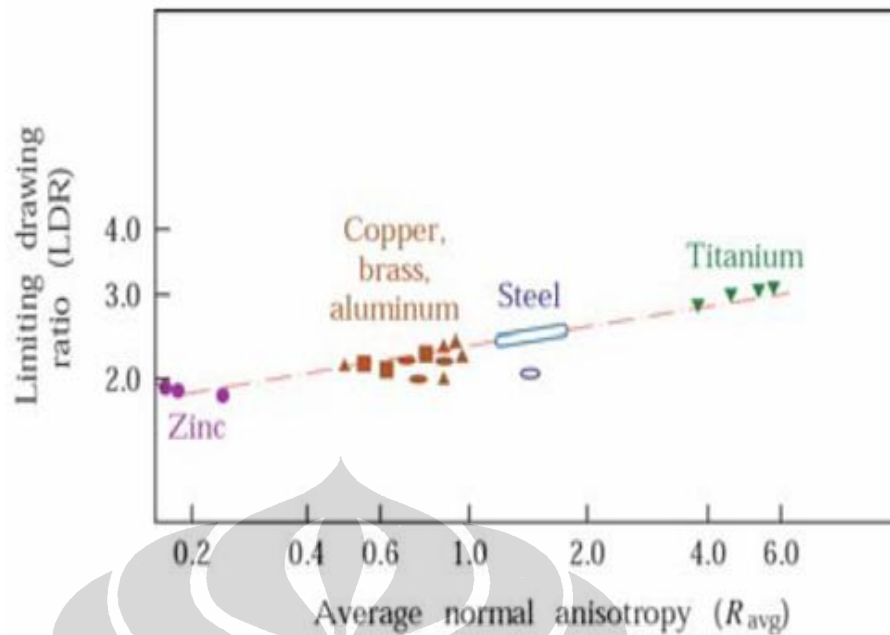
Gesekan pada blank holder dan di atas profil cetakan akan meningkatkan gaya penarikan. Dengan adanya pelumasan maka gesekan yang terjadi pada

permukaan kontak antara logam dan cetakan dapat dikurangi. Adanya gesekan meningkatkan gaya deformasi yang dibutuhkan, yang selanjutnya akan meningkatkan kemungkinan kegagalan. Gabungan antara pelumasan yang baik, cetakan yang halus, dan kehalusan permukaan penekan dapat meningkatkan LDR (Hosford dan Caddell, 1983).

Semakin tinggi nilai LDR maka akan memiliki *deep drawability* yang semakin baik. Pengaruh material terhadap nilai LDR, dapat dilihat pada Gambar 2.23. Semakin tinggi nilai anisotropi normal \bar{R} (*average strain ratio*), maka nilai LDR semakin tinggi.



Gambar 2.22 Parameter-Parameter Yang Mempengaruhi Proses *Deep Drawing* (Medraj, 2004)



Gambar 2.23 Hubungan Antara \bar{R} (*Average Strain Ratio*) dengan LDR (*Limiting Draw Ratio*) Untuk Beberapa Lembaran Logam (Dieter, 1988)

Kemampuan bahan untuk diproses *deep drawing* dinyatakan dengan *Limiting Drawing Ratio* (LDR) yaitu perbandingan antara diameter *blank* maksimum yang dapat dibentuk tanpa gagal menjadi sebuah mangkuk, D_{maks} dengan diameter penekan yang digunakan, d .

$$LDR = \frac{D_{maks}}{d} \quad (\text{Persamaan 2.9})$$

Nilai LDR sangat tergantung dari jenis bahannya. Bahan yang baik untuk diproses *deep drawing* harus memiliki kekuatan lebih terhadap ketahanan penipisan pada dinding mangkuk dari pada daerah *flange* (yaitu bahan dengan nilai $\bar{R} > 1$).

Secara teoritis hubungan antara *Limiting Drawing Ratio* dan nilai anisotropi R dapat digunakan dengan asumsi :

- energi yang digunakan seluruhnya untuk mendeformasi *flange*
- material tidak mengalami penguatan ($n = 0$)
- kondisi aliran deformasi di *flange* adalah regangan bidang ($\sigma_3 = 0$) dan
- sifat materialnya arah putaran simetris (anisotropi planar dan anisotropi normal).

2.4. Analisis Proses Secara Statistik (*Statistical Process Control - SPC*)

Statistical process control adalah suatu teknik statistik yang digunakan dalam industri manufaktur untuk mengukur proses produksi dalam rangka memudahkan pengambilan keputusan dan tindakan perbaikan. Pada analisis ini parameter yang diukur adalah kestabilan proses (*process stability*) dan kemampuan proses (*process capability*).

2.4.1 Analisis Kestabilan Proses (*Process Stability*)

Analisis kestabilan proses adalah suatu metode untuk mengukur sejauh mana suatu proses produksi dapat memenuhi toleransi yang telah ditentukan agar tidak terjadi penolakan oleh pelanggan. Analisis kestabilan proses dilakukan dengan cara membuat grafik rata-rata ($X\text{-bar}$ chart) dan grafik perbedaan nilai tertinggi dan terendah ($R\text{-chart}$) (Ishikawa, 1989). Untuk membuat grafik rata-rata perlu menghitung *control limit* (CL), *upper control limit* (UCL) dan *lower control limit* (LCL), dengan persamaan tersebut dibawah ini (Gasversz,1998).

$$CL = \bar{X} \quad (\text{Persamaan 2.10})$$

$$UCL = \bar{X} + A_2\bar{R} \quad (\text{Persamaan 2.11})$$

$$LCL = \bar{X} - A_2\bar{R} \quad (\text{Persamaan 2.12})$$

Untuk membuat grafik R perlu menghitung CL, UCL dan LCL, dengan persamaan tersebut dibawah ini, sedangkan nilai A_2 , D_3 dan D_4 dapat dilihat pada Lampiran 25.

$$CL = \bar{R} \quad (\text{Persamaan 2.13})$$

$$UCL = D_4\bar{R} \quad (\text{Persamaan 2.14})$$

$$LCL = D_3\bar{R} \quad (\text{Persamaan 2.15})$$

Suatu proses produksi dikatakan stabil apabila grafik $X\text{-bar}$ dan grafik R mempunyai kriteria seperti berikut (Gasversz,1998):

- Tidak ada nilai yang berada diluar garis batas atas (*UCL – Upper Control Limit*).
- Tidak ada nilai yang berada diluar garis batas bawah (*LCL – Lower Control Limit*).
- Tidak ada kecendrungan keatas.
- Tidak ada kecendrungan kebawah.

2.4.2 Analisis Kemampuan Proses (*Process Capability*)

Analisis kemampuan proses dilakukan dengan menghitung indeks Cpk (*process capability kane*) setelah terlebih dahulu diketahui bahwa proses tersebut adalah stabil. Secara umum kemampuan dan kestabilan proses dipengaruhi oleh 4M + 1E (*Material, Machine, Man, Method* dan *Environment*). Jadi setiap ada perubahan salah satu atau lebih dari 4M + 1E tersebut, perlu dilakukan analisis kemampuan dan kestabilan proses (Gasversz,1998). Dalam hal ini, penelitian diarahkan kepada material.

Indek Cpk dihitung dengan rumus $(USL - LSL)/3S$ untuk ukuran yang mempunyai standar 2 sisi (*USL* dan *LSL*), dan $(\bar{X} - LSL)/3S$ untuk standar 1 sisi (minimum saja) atau $(USL - \bar{X})/3S$ untuk standar 1 sisi (maksimum saja). Suatu proses dikatakan mampu apabila indeks Cpk diatas 1,33.

Dimana : *USL* adalah batas spesifikasi bawah (*Upper Specification Limit*).

LSL adalah batas spesifikasi bawah (*Lower Specification Limit*).

S adalah standar deviasi (*deviation standard*).

Perubahan material baru bisa dilakukan apabila hasil analisis kestabilan dan kemampuan proses pada waktu produksi dengan menggunakan material tersebut menunjukkan nilai yang stabil (*stable*) dan mampu (*capable*). Apabila tidak, maka harus dilakukan perbaikan terhadap material tersebut dan dilakukan analisis ulang.

Indeks performansi Kane (Cpk), merefleksikan kedekatan nilai rata-rata dari proses terhadap salah satu batas spesifikasi atas (*USL*) atau batas spesifikasi bawah (*LSL*). Cpk dihitung dengan persamaan tersebut dibawah ini:

Cpk untuk spesifikasi 2 sisi adalah :

$$Cpk = \min (CPL , CPU). \quad (\text{Persamaan 2.16})$$

$$CPL = (\bar{X} - LSL) / 3 S \quad (\text{Persamaan 2.17})$$

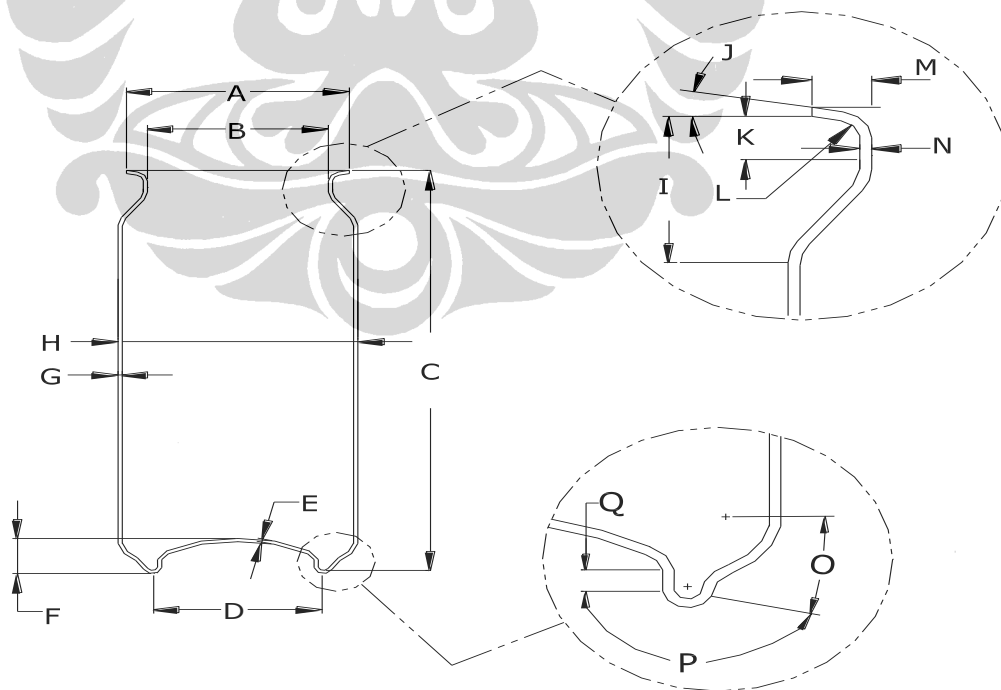
$$CPU = (USL - \bar{X}) / 3S \quad (\text{Persamaan 2.18})$$

Dimana: CPL adalah Indeks kapabilitas bawah, dan CPU adalah Indeks kapabilitas atas. Cpk untuk spesifikasi 1 sisi adalah CPL atau CPU.

Adapun interpretasi untuk Cpk adalah seperti berikut:

1. $Cpk > 1,33$: proses dianggap mampu.
2. $1 < Cpk < 1,33$: proses dianggap mampu akan tetapi perlu pengawasan Intensif.
3. $Cpk < 1$: proses dianggap tidak mampu.

Indeks Cpk, grafik \bar{X} -bar dan grafik R bisa dilakukan dengan menggunakan *software computer NWA Quality Analyst 5.1* yang dapat menghitung secara otomatis sesuai dengan rumus tersebut diatas. Gambar 2.24 memperlihatkan ukuran kemasan kaleng 330 ml, dari Gambar tersebut dimensi yang berhubungan secara langsung dengan material adalah, *Neck Plug Diameter (B)*, *Finished Can Height (C)*, *Metal Gauge (E)*, *Dome Depth (F)*, *Thin Wall Thickness (G)*, dan *Neck Thickness (N)* (Coca-Cola, 2001).



Gambar 2.24 Ukuran Kemasan Kaleng 330 ml (Coca-Cola, 2001)

Lampiran 15, memperlihatkan standar dimensi seluruh ukuran kemasan kaleng 330 ml yang harus dipenuhi, baik pada waktu melakukan analisis dalam rangka perubahan material ataupun produksi secara komersial. Disamping itu masih ada parameter lain yang berhubungan sangat erat dengan material yaitu, kekuatan dome menahan tekanan dari dalam (*dome reversal pressure*) dan kekuatan badan kaleng menahan gaya vertikal (*axial load*), Seluruh parameter tersebut merupakan standar yang sudah disepakati kedua belah pihak antara perusahaan pembuat kemasan kaleng (pemasok) dengan perusahaan minuman (pelanggan), dan parameter tersebut merupakan standar internasional (Coca-Cola, 2001).

