

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. MATERIAL POLIMER

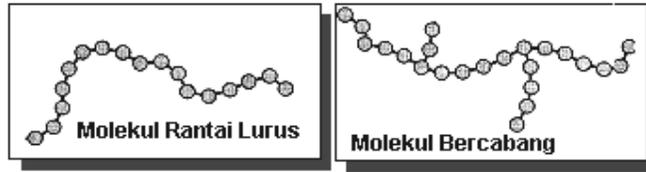
Polimer (*polymer*) berasal dari bahasa Yunani yaitu *poly* (banyak) dan *mer* (partikel/molekul). Polimer adalah molekul besar (makromolekul) yang dibangun oleh pengulangan unit kimia yang kecil dan sederhana (*mer*). Unit yang diulang dapat sama atau hampir sama dengan *monomer*, yaitu material awal pembentuk polimer. Pengulangan ini akan terus terjadi hingga menjadi seperti rantai disebut rantai polimer. Istilah “plastik” diartikan sebagai polimer (dengan rantai yang sangat panjang) yang diproses baik dalam keadaan *plastic* maupun *soft* yang memiliki kemampuan alir dan juga dapat dibentuk.

Pada dasarnya, polimer dapat dibagi atas polimer alamiah dan polimer sintetis. Polimer alamiah adalah polimer yang langsung diambil dari tumbuh-tumbuhan dan hewan. Polimer jenis ini telah dimanfaatkan manusia selama berabad-abad seperti karet, kayu, kapas, wol dan kulit. Selain itu, terdapat pula polimer alamiah yang sangat diperlukan dalam proses-proses biologis dan fisiologis tumbuh-tumbuhan dan hewan, seperti protein, enzim dan selulosa. Sedangkan polimer sintetis merupakan polimer hasil buatan manusia. Saat ini hampir seluruh peralatan manusia, baik sebagian atau seluruhnya terbuat dari polimer sintetis.

Polimer diklasifikasikan berdasarkan struktur makromolekul dan mekanisme ikatan di dalamnya. Berdasarkan kriteria tersebut, polimer dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok, yaitu termoplastik, termoset, dan elastomer.

2.1.1. Termoplastik

Polimer terdiri dari makromolekul dengan rantai linear atau bercabang, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1, yang menyatu bersama dalam ikatan antar molekul yang disebut termoplastik.



Gambar 2.1. Bentuk molekul rantai polimer [1]

Termoplastik akan melunak (*softening*) jika dipanaskan sehingga akan melemahkan tenaga antar molekul yang kemudian mudah untuk dicetak. Dibedakan dengan polimer lain, produk termoplastik yang telah dicetak dapat dipanaskan kembali untuk dicetak lagi (berulang).

2.1.1.1. Termoplastik Amorf

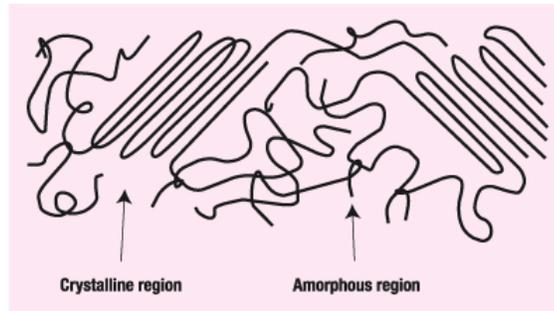
Polimer dengan banyak rantai molekul cabang dan dengan rantai samping yang panjang tidak dapat dikompakkan karena struktur yang tidak teratur. Rantai molekul-molekul ini bersaling-silang melilit seperti benang kusut. Plastik yang tidak terstruktur disebut termoplastik amorf. Gambar 2.2 berikut menggambarkan rantai polimer amorf.



Gambar 2.2. Rantai polimer amorf [2]

2.1.1.2. Termoplastik Semikristalin

Hanya sebagian tertentu dari rantai molekul yang tersusun dalam susunan yang rapat, padat dan teratur. Sedang sebagian lain tetap dalam keadaan saling-silang dan melilit. Termoplastik yang memiliki bagian kristalin dan amorf seperti yang digambarkan pada Gambar 2.3 berikut disebut termoplastik semikristalin.



Gambar 2.3. Rantai polimer semikristalin [3]

Perbedaan antara termoplastik amorf dan kristalin dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

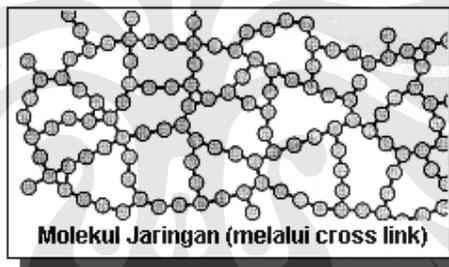
Tabel 2.1. Sifat dan struktur dari polimer amorf dan kristalin

	Amorf	Kristalin
Contoh material	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ABS ➤ Acrylics ➤ Polycarbonate (PC) ➤ Polystyrene (PS) ➤ Polyvinyl Chloride (PVC) ➤ Styrene Acrylonitrile (SAN) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acetals ➤ Nylons ➤ Polyethylene (PE) ➤ Polypropylene (PP) ➤ Thermoplastic Polyester (e.g. PBT, PET)
Mikro struktur	Orientasi molekul acak dalam fase solid maupun liquid	Orientasi molekul acak pada saat fase liquid, tetapi terbentuk kristalit-kristalit padat saat fase solid
Reaksi terhadap panas	Meleleh pada rentang temperatur tertentu (tidak ada temperatur leleh yang jelas)	Ada temperatur leleh yang jelas
Sifat-sifat umum	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transparan ➤ Ketahanan kimia buruk ➤ Volumetric shrinkage rendah saat molding ➤ Umumnya kurang kuat 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Translucent atau opaque ➤ Ketahanan kimia sangat baik ➤ Volumetric shrinkage tinggi saat molding

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Viskositas melt umumnya tinggi ➤ Heat content lebih rendah 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umumnya kuat ➤ Viskositas melt umumnya rendah ➤ Heat content lebih tinggi (dengan panas dari kristalisasi)
--	---	--

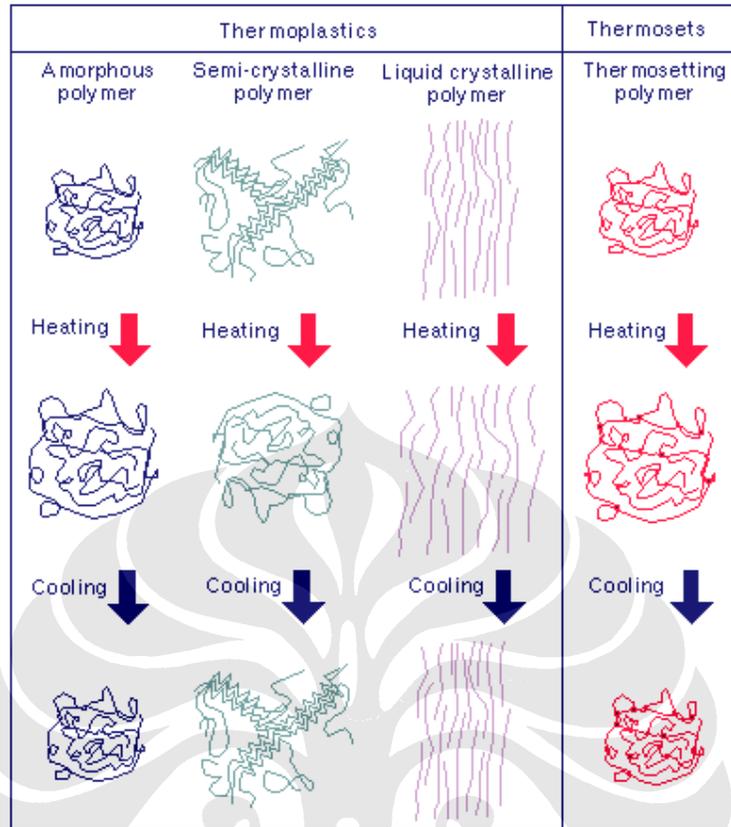
2.1.2. Termoset

Termoset adalah polimer yang mempunyai struktur ikat silang yang rapat (jauh lebih banyak dan rapat daripada elastomer). Ikatan silang termoset dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah.



Gambar 2.4. Ikatan silang pada termoset [1]

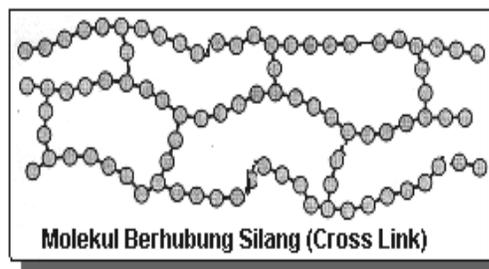
Ikatan silang inilah yang membuat termoset tidak meleleh saat dipanaskan melainkan menjadi bertambah keras. Pada pembuatan termoset dari resin pun, ada perbedaan mendasar dengan pembuatan termoplastik, yaitu jika termoplastik dibuat dengan pendinginan dari bentuk resin yang cair karena ikatan pada termoplastik tercerai-berai saat dipanaskan dan mencair dan ikatan yang tercerai-berai itu akan menyatu kembali saat pendinginan. Lain halnya dengan termoset, resin cair tidak didinginkan melainkan dipanaskan untuk mengeras. Sifat makin mengeras jika dipanaskan ini disebabkan oleh ikatan silang yang tidak dapat terlepas satu sama lain (berkaitan). Mikrostruktur dari termoplastik dan termoset selama proses pemanasan dan pendinginan diilustrasikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Mikrostruktur dari efek pemanasan dan pendinginan selama proses pada termoplastik dan termoset [4]

2.1.3. Elastomer

Rantai molekul dari elastomer mempunyai sedikit jumlah ikatan silang dan tersusun secara acak (ketidakteraturan). Gambar 2.6 di bawah mengilustrasikan ikatan silang pada elastomer



Gambar 2.6. Ikatan silang pada elastomer [1]

Termoset dan elastomer dikategorikan sebagai polimer ikat silang (*cross link*) karena setiap individunya dihubungkan dengan ikatan penghubung (*transverse bond*). Pada suhu ruang, molekul yang mempunyai banyak *cross link* akan sangat keras (*hardness*) tetapi mudah patah (*brittle*) yaitu sensitif terhadap beban kejut (*impact*). Seperti halnya elastomer, termoset tidak meleleh jika dipanaskan karena banyaknya *cross link*.

Polimer kristalin umumnya terdiri dari kristal-kristal yang membaaur dengan struktur amorf. Polimer dapat membentuk kristal apabila memiliki struktur rantai atau segmen rantai yang bergabung sangat dekat sehingga gaya Van der Waals dapat memainkan peran, dan tidak terbentuk bulk dalam rantai harus tidak bersifat polar. Polimer mengkristal pada suhu tertentu ketika segmen-segmen rantai molekul mencapai posisi lurus dalam gerakan yang tidak beraturan. Di sini suhu memegang peran sangat penting, dan kecepatan kristalisasi akan menentukan besarnya ukuran kristal.

Berdasarkan uraian di atas kita temukan plastik jenis termoplastik, termoset dan elastomer, seperti yang diberikan pada Tabel 2.2 di bawah ini

Tabel 2.2. Jenis plastik beserta contohnya

Jenis Plastik	Contoh
Thermoplastik	polietilen, polipropilen, polistiren, polivinil khlorida, ABS, nilon, poliester, polikarbonat.
Termoset	epoxy resin, alkyd resin, UF, MF, PF, unsaturated poliester.
Elastomer	karet alam dan sintesis.

2.2. REOLOGI

Reologi adalah ilmu yang membahas deformasi dan aliran material. Secara umum, semua material mengalir pada waktu tertentu. Yang membuat material polimer menarik dalam konteks ini adalah fakta bahwa konstanta waktunya untuk

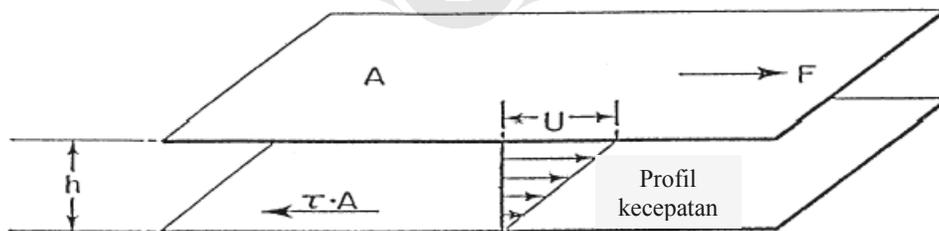
mengalir berada pada urutan besaran yang sama dengan waktu prosesnya pada ekstrusi, cetak injeksi, dan cetak tiup. Pada waktu proses yang sangat pendek, polimer bisa bersifat solid, sementara pada waktu proses yang lama, bersifat fluida. Sifat dasar ganda antara fluida dan solid disebut sebagai sifat viskoelastis.

2.3.1. Viskositas Dan Indeks Alir Lelehan

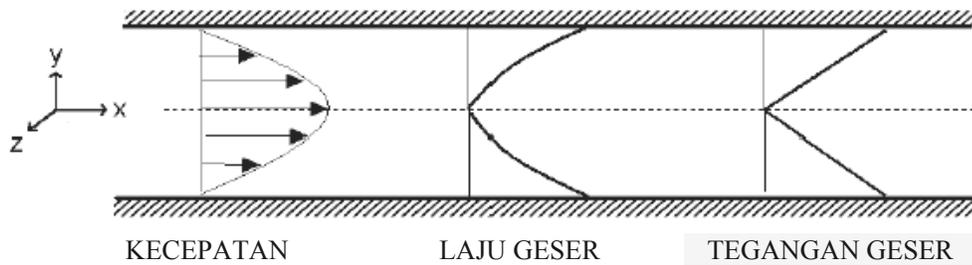
Viskositas adalah sifat alir yang paling penting. Sifat ini menunjukkan ketahanan untuk mengalir. Berdasarkan Gambar 2.7, viskositas dapat ditentukan sebagai rasio dari tegangan geser (gaya F, diaplikasikan secara tangensial, dibagi luas permukaan A), dan laju geser (kecepatan V, dibagi jarak h).

$$\eta = \frac{\text{TEGANGAN GESER}}{\text{LAJU GESER}} = \frac{F/A}{V/h} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Untuk aliran yang melalui tabung silinder atau antara dua pelat datar, tegangan geser bervariasi secara linier dari nol di sepanjang sumbu sentral sampai nilai maksimum di sepanjang dinding. Laju geser bervariasi tidak secara linier dari nol di sepanjang sumbu sentral sampai maksimum di sepanjang dinding. Profil kecepatannya adalah kuasi-parabolik dengan nilai maksimum di bidang tengah dan nol di dinding, seperti ditunjukkan Gambar 2.8, untuk aliran di antara dua pelat datar.



Gambar 2.7. Aliran geser sederhana [5]



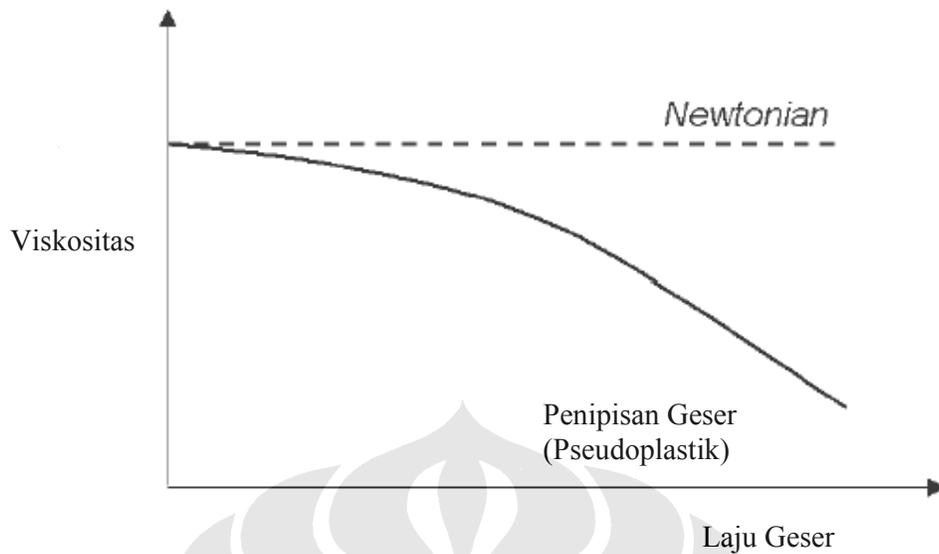
Gambar 2.8. Profil kecepatan, tegangan geser, dan laju geser untuk aliran di antara dua pelat datar [5]

Viskositas dalam SI memiliki satuan Pa.s (Pascal.sekon). Sebelum adanya SI, poise adalah satuan yang paling sering dipakai ($1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ poise}$). Berikut adalah beberapa faktor konversi penting.

$$1 \text{ Pa.s} = 1.45 \times 10^{-4} \text{ lb}_f \text{ s/in}^2 = 0.67197 \text{ lb}_m/\text{s ft} = 2.0886 \times 10^{-2} \text{ lb}_f \text{ s/ft}^2$$

Viskositas air adalah 10^{-3} Pa.s sementara viskositas kebanyakan polimer leleh di bawah pengaruh kondisi ekstrusi bervariasi dari 10^2 Pa.s sampai 10^5 Pa.s . Tegangan geser memiliki satuan Pa (N/m^2) atau psi (lb_f/in^2) dan laju geser memiliki satuan s^{-1} .

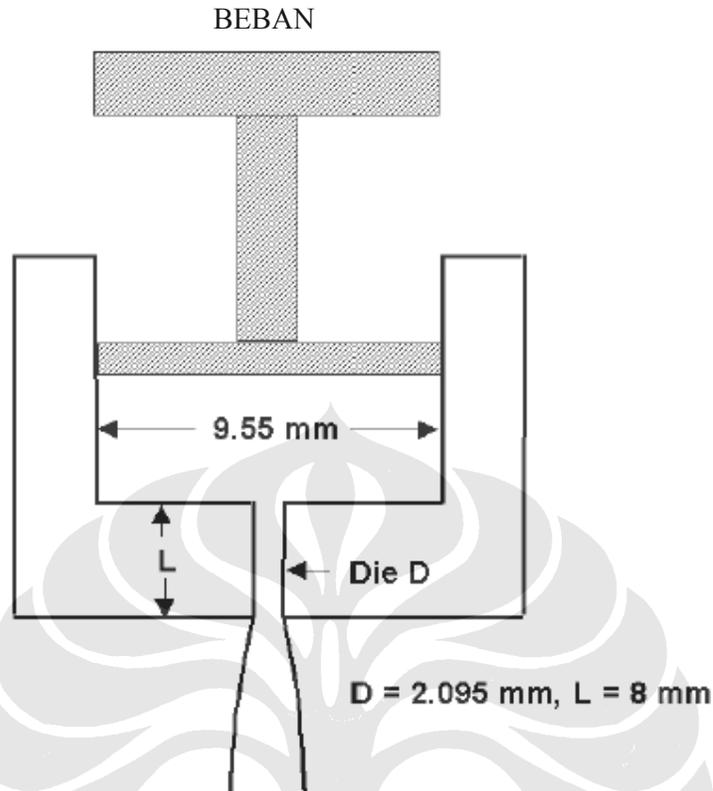
Salah satu sifat yang luar biasa dari cairan polimer adalah sifat penipisan-geser (*shear-thinning*), dikenal juga sebagai sifat pseudo-plastik. Jika laju geser ditingkatkan (mempercepat ekstrusi melalui *die*), viskositas menurun, seperti terlihat pada Gambar 2.9. Penurunan viskositas ini disebabkan oleh susunan molekul dan pelepasan lilitan rantai panjang polimer.



Gambar 2.9. Sifat viskositas *newtonian* dan penipisan geser [5]

Semakin tinggi laju geser, semakin mudah untuk menekan polimer untuk mengalir melewati *die* dan peralatan proses. Dalam ekstrusi *screw* tunggal, laju geser dapat mencapai 200 s^{-1} dalam saluran *screw* di dekat barrel, dan jauh lebih tinggi di antara *flight tip* dan barrel. Pada bibir *die*, laju geser dapat mencapai setinggi 1000 s^{-1} . Laju geser rendah pada *die* menandakan pergerakan lamban polimer leleh pada permukaan logam. Beberapa disainer *die* mencoba membuat *die* untuk operasi *cast film* atau *blown film* yang tidak punya laju geser dinding kurang dari, katakanlah 10^{-1} , untuk mencegah masalah potensial material leleh. Ketika tegangan geser dinding melebihi 0.14 MPa , *sharkskin* (kekasaran permukaan) terjadi pada perhitungan viskometer kapiler dengan menggunakan beberapa *grade* HDPE. Pada laju geser yang sangat tinggi, ketidakstabilan alir yang disebut sebagai kegagalan leleh (*melt fracture*) terjadi.

Indeks alir lelehan (untuk PP) dalam gram per 10 menit yang keluar dari *die* dengan dimensi yang ditentukan menurut Standar ASTM di bawah tekanan beban spesifik seperti digambarkan pada Gambar 2.10. Untuk polietilena (ASTM D1238) beban adalah 2.16 kg dan dimensi *die*, $D = 2.095 \text{ mm}$ dan $L = 8 \text{ mm}$. Percobaan dilakukan pada temperatur 190°C (PE), dan temperatur 230°C (PP) dengan memakai beban dan dimensi yang sama seperti pada pengujian PE.



Gambar 2.10. Skema *melt indexer* (alat uji indeks alir lelehan) [5]

Dalam kondisi pengukuran indeks lelehan dengan beban 2.16 kg, tegangan geser dinding dapat dihitung menjadi $\tau_w = 1.94 \times 10^4$ Pa (= 2.814 psi) dan laju geser dinding mendekati $\dot{\gamma} = (1838/\rho) \times \text{MFI}$ (*melt flow index* = indeks alir lelehan) di mana ρ adalah massa jenis lelehan dalam kg/m^3 . Dengan mengasumsikan $\rho = 766 \text{ kg/m}^3$ untuk lelehan PE, maka didapat $\dot{\gamma} = 2.4 \times \text{MFI}$. Indeks leleh kecil berarti berat molekul tinggi, polimer yang sangat kental (viskositas tinggi). Indeks leleh tinggi berarti berat molekul rendah, polimer dengan viskositas rendah. Jika indeks leleh kurang dari 1, maka material dapat dikatakan memiliki indeks leleh kecil. Material seperti itu digunakan untuk ekstrusi film. Kebanyakan *grade* PE ekstrusi jarang melebihi $\text{MFI} = 12$, tetapi, untuk cetak injeksi, MFI biasanya berkisar antara 5-100.

Viskositas dapat dihitung dengan viskometer kapiler ataupun rotasional. Pada viskometer kapiler, tegangan geser dihitung dari tekanan yang dihasilkan oleh piston. Laju geser dihitung dari laju alir.

$$\tau_w = \frac{\Delta P_{\text{cap}}}{L/R} \quad \text{tegangan geser} \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad \text{laju geser } \textit{apparent} \quad (2.3)$$

Di mana ΔP_{cap} adalah penurunan tekanan, L adalah panjang pipa kapiler, R adalah radius, dan Q adalah volum laju alir.

Laju geser *apparent* (*apparent shear rate*) tersebut mirip dengan sifat perilaku *Newtonian* (fluida dengan viskositas konstan). Sebuah pembetulan diperlukan (*Rabinowitsch correction*) untuk fluida dengan sifat penipisan geser (*shear-thinning*). Untuk model *power-law*, laju geser yang sebenarnya (*true shear rate*) (berdasarkan *Rabinowitsch correction*) menjadi,

$$\dot{\gamma} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.4)$$

Ini berarti bahwa untuk material dengan indeks *power-law* $n = 0.4$ (sangat umum), hubungan antara laju geser *apparent* dan *true* adalah,

$$\dot{\gamma}_{\text{true}} = 1.375 \times \dot{\gamma}_{\text{apparent}} \quad (2.5)$$

Jika kapiler relatif pendek ($L/R < 50$), diperlukan *Bagley correction* untuk memperhitungkan penurunan tekanan berlebih ΔP_e pada pintu masuk kapiler. Persamaan *Bagley correction* biasanya seperti,

$$n_B = \frac{\Delta P_e}{2\tau_w} \quad (2.6)$$

Di mana n_B bervariasi dari 0 sampai mungkin 20 jika material polimer diekstrusi dekat pada tegangan kritis untuk *sharkskin*. Untuk fluida *Newtonian*, nilai n_B adalah 0.587. Tegangan geser berdasarkan *Bagley correction* menjadi,

$$\tau_w = \frac{\Delta P_{cap} + \Delta P_e}{2 \left(\frac{L}{R} + n_B \right)} \quad (2.7)$$

Untuk mengaplikasikan *Bagley correction*, diperlukan sedikitnya pengukuran dengan 2 kapiler.

Sifat penipisan geser (*shear-thinning*) sering dirumuskan dalam model *power-law*,

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.8)$$

Di mana m adalah tetapan dan n adalah eksponen *power-law*. Untuk $n = 1$, didapat model *Newtonian* (viskositas konstan). Semakin kecil nilai n , polimer akan semakin bersifat *shear-thinning*. Rentang yang umum untuk eksponen *power-law* adalah antara 0.8 (untuk PC) dan 0.2 (untuk campuran karet). Untuk variasi *grade* polietilena, rentangnya adalah $0.3 < n < 0.6$. Tetapan mempunyai nilai pada rentang umum yaitu 1000 Pa.s^n (beberapa resin PET) sampai $100,000 \text{ Pa.s}^n$ untuk PVC kaku dengan kekentalan tinggi. Model *power-law* ini bagus untuk data viskositas pada laju geser tinggi tapi tidak untuk laju geser rendah (karena jika $\dot{\gamma}$ mendekati nol, maka viskositas mendekati tak hingga).

Perhitungan yang mendekati untuk m dan n dapat dilakukan dengan menggunakan dua nilai indeks lelehan (MFI dan HLMI). MFI berdasarkan pada beban standar 2.16 kg dan HLMI (*High Load Melt Index*) pada beban tinggi (10 kg atau 21.6 kg). Dengan memanipulasi persamaan yang tepat untuk penurunan tekanan (*pressure drop*), tegangan geser, dan laju alir, didapatkan:

$$\text{Eksponen } power\text{-law} \quad n = \frac{\log(HL) - \log(LL)}{\log(HLMI) - \log(MI)} \quad (2.9)$$

$$\text{Tetapan} \quad m = \frac{8982 \times (LL)}{\left[\frac{1828}{\rho} \times MI \right]^n} \quad (2.10)$$

Di mana LL adalah beban standar (biasanya 2.16 kg) dan HL adalah beban tinggi (*High Load*) (biasanya 10 kg atau 21.6 kg).

Dua model lain sering digunakan untuk penyesuaian data yang lebih baik pada keseluruhan rentang laju geser:

- **Carreau-Yasuda**

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{n-a} \quad (2.11)$$

Di mana η_0 adalah viskositas pada saat laju geser sama dengan nol dan λ , a , dan n adalah parameter.

- **Cross Model**

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (2.12)$$

Di mana η_0 adalah viskositas pada laju geser nol dan λ dan n adalah parameter.

Dengan viskometer rotasional (*cone-and-plate* atau *parallel-plate*), tegangan geser ditentukan dari torsi yang bekerja dan laju geser dari kecepatan rotasi dan jarak di mana fluida digeser.

Viskometer kapiler biasanya digunakan untuk rentang laju geser dari sekitar 2 s^{-1} sampai mungkin 3000 s^{-1} . Viskometer rotasional biasanya digunakan untuk rentang 10^{-2} s^{-1} sampai sekitar 5 s^{-1} . Pada kecepatan rotasi yang tinggi, aliran sekunder dan ketidakstabilan mungkin terjadi yang membuat asumsi aliran geser sederhana menjadi tidak berlaku.

Viskositas polimer leleh bervariasi terhadap temperatur secara eksponensial:

$$\eta = \eta_{ref} \exp(-b\Delta T) \quad (2.13)$$

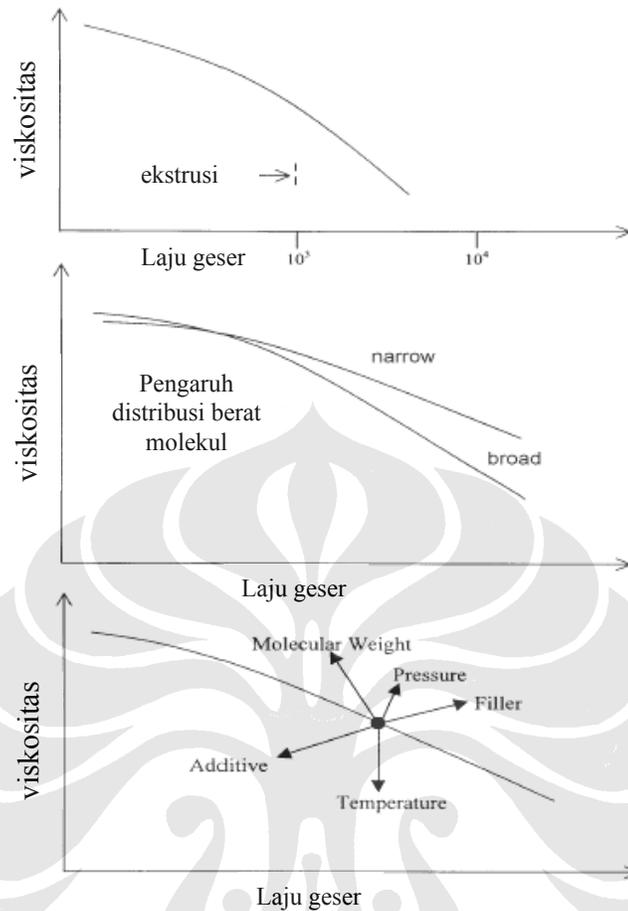
Nilai koefisien sensitivitas temperatur b berkisar dari sekitar 0.01 sampai $0.1 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Untuk *grade* umum poliolefin, dapat diasumsikan bahwa $b = 0.015$. Ini berarti bahwa untuk peningkatan temperatur $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, viskositas berkurang 14%.

Pengaruh dari bermacam-macam faktor pada viskositas dirangkum pada Gambar 2.11. Polimer dengan distribusi berat molekul sempit linier (contohnya *metallocenes*) lebih kental daripada polimer dengan distribusi berat molekul lebar. *Filler* dapat meningkatkan viskositas (sangat besar). Tekanan menyebabkan peningkatan viskositas (dapat diabaikan pada kondisi ekstrusi normal). Aditif yang bermacam-macam disediakan dan didisain untuk menurunkan viskositas. Viskositas pada saat tidak ada geseran meningkat dengan berat molekul rata-rata:

$$\eta_0 = \text{const} M_w^{3.4} \quad (2.14)$$

Untuk beberapa PE *metallocene* dengan percabangan rantai yang panjang, eksponen bisa jauh lebih tinggi (sekitar 6.0).

Pada perhitungan viskositas di atas, diasumsikan bahwa kondisi non-slip pada dinding *die* adalah valid. Tetapi, kasus nyatanya tidak selalu seperti ini. Kenyataannya, pada tingkat tegangan geser sekitar 0.1 MPa untuk PE, terjadi slip. Slip pada dinding berkaitan dengan fenomena *sharkskin*. Slip pada dinding dihitung dengan metode Mooney di mana laju geser *apparent* ($4Q / \pi R^3$) di-plot terhadap $1/R$ untuk beberapa kapiler yang mempunyai radius berbeda-beda. Dengan tidak adanya slip, plot menjadi horizontal. Kemiringan (*slope*) garis sebanding dengan 4 x (kecepatan slip).



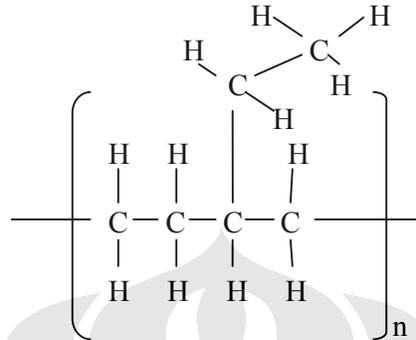
Gambar 2.11. Pengaruh beberapa parameter terhadap viskositas polimer [5]

2.3. LLDPE (*LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE*)

2.3.1. Pendahuluan

Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) adalah polimer linear (polietilena), dengan sejumlah besar cabang-cabang pendek, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.12, biasanya dibuat dari kopolimerisasi etilena dengan rantai olefin yang lebih panjang. LLDPE berbeda secara struktural dari LDPE konvensional karena tidak adanya rantai bercabang yang panjang. Linearitas LLDPE dihasilkan dari proses manufaktur yang berbeda antara LLDPE dan LDPE. Secara umum, LLDPE diproduksi, pada temperatur dan tekanan yang lebih rendah, oleh kopolimerisasi etilena dan beberapa alfa olefin yang lebih tinggi seperti butena, heksena, atau oktana. Proses kopolimerisasi menghasilkan

polimer LLDPE yang punya distribusi berat molekul yang lebih sempit daripada LDPE konvensional dan dalam kombinasi dengan struktur linearnya, sangat berbeda sifat reologinya.



Gambar 2.12. Rantai karbon LLDPE

2.3.2. Produksi dan Sifat-Sifat

Produksi LLDPE dimulai oleh katalis logam transisi, khususnya tipe katalis Ziegler atau Philips. Proses polimerisasi aktual dapat dilakukan pada reaktor fase larutan ataupun fase gas. Biasanya, oktana adalah kopolimer pada fase larutan sementara butena dan heksena dikopolimerisasikan dengan etilena pada reaktor fase gas. Resin LLDPE yang diproduksi dalam reaktor fase gas adalah dalam bentuk butiran dan dapat dijual sebagai butiran atau diproses menjadi pelet. LLDPE punya kekuatan tarik dan dampak yang lebih tinggi dan ketahanan penetrasi yang lebih tinggi daripada LDPE. LLDPE sangat fleksibel dan memanjang akibat tegangan. LLDPE dapat digunakan untuk membuat film yang lebih tipis, dengan ketahanan *environmental stress cracking* yang lebih baik. LLDPE juga punya ketahanan baik terhadap zat kimia dan radiasi ultraviolet, serta sifat elektrik yang bagus. Tetapi, LLDPE tidak dapat diproses semudah LDPE, punya sifat kilap yang lebih rendah, dan rentang *heat sealing* yang lebih sempit. Sifat-sifat fisik LLDPE secara umum dirangkum pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Sifat-sifat fisik LLDPE [6]

Sifat	Nilai
Densitas	0.92 g/cm ³
Kekerasan permukaan	SD48
Kekuatan tarik	20 MPa
Modulus fleksural	0.35 GPa
<i>Notched izod</i>	1.06+ kJ/m
Ekspansi termal	20×10 ⁻⁵ /°C
Perpanjangan saat putus	500%
<i>Strain at yield</i>	20%
Temperatur operasi maksimum	50 °C
Absorpsi air	0.01%
Indeks oksigen	17%
<i>Flammability UL94</i>	HB
<i>Volume resistivity</i>	log(16) Ω·cm
Kekuatan dielektrik	25 MV/m
Faktor disipasi 1kHz	909090
Konstanta dielektrik 1kHz	2.3
HDT @ 0.45 MPa	45 °C
HDT @ 1.80 MPa	37 °C
Pengeringan material	NA
Rentang temperatur leleh	120 sampai 160 °C
<i>Mold shrinkage</i>	3%
Rentang temperatur <i> mold</i>	20 sampai 60 °C

2.3.3. Proses

LDPE dan LLDPE punya sifat reologi atau aliran leleh yang unik. LLDPE lebih kurang sensitif terhadap *shear* disebabkan oleh distribusi berat molekulnya yang lebih sempit dan percabangan rantai yang lebih pendek. Selama proses *shearing*, seperti ekstrusi, LLDPE tetap lebih kental, sehingga lebih sulit diproses daripada LDPE dengan indeks alir lelehan yang ekuivalen. Semakin rendah

sensitivitas LLDPE terhadap *shear*, semakin cepat relaksasi tegangan dari rantai polimer selama ekstrusi dan sehingga sifat fisiknya mudah berubah rasio *blow-up*-nya. Dalam ekstensi lelehan, LLDPE punya kekentalan yang lebih rendah pada semua *strain rate*. Ini berarti LLDPE tidak akan mengeras akibat *strain* sebagaimana LDPE mengeras ketika dipanjangkan. Ketika laju deformasi polietilena meningkat, LDPE menunjukkan peningkatan dramatis pada kekentalannya karena lilitan rantainya. Fenomena ini tidak terjadi pada LLDPE disebabkan oleh kurangnya percabangan rantai yang panjang sehingga memungkinkan rantai-rantai tersebut “bergulir” satu sama lain ketika diperpanjang tanpa saling terbelit. Karakteristik ini diperlukan untuk aplikasi film karena film LLDPE dapat ditarik dengan mudah sementara tetap mempertahankan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Sifat-sifat reologi LLDPE disimpulkan sebagai “kaku pada *shear*” dan “lunak pada perpanjangan”.

2.4. INDEKS ALIR LELEHAN (*MELT FLOW INDEX*)

2.4.1. Pengertian

Indeks alir lelehan (MFI) adalah ukuran kemudahan alir dari suatu lelehan polimer termoplastik. Ukuran tersebut didefinisikan sebagai massa polimer dalam gram per 10 menit yang keluar melalui lubang kapiler dengan diameter dan panjang tertentu dan didorong oleh tekanan dari beban alternatif pada temperatur alternatif. Metode ini tercantum dalam ASTM D1238 dan ISO 1133.

MFI adalah ukuran tidak langsung dari berat molekul. Sebagai contoh, indeks alir lelehan yang tinggi mengindikasikan berat molekul yang rendah. Pada waktu yang sama, indeks alir lelehan dapat diartikan pula sebagai ukuran kemampuan lelehan material untuk mengalir di bawah tekanan. Indeks alir lelehan berbanding terbalik dengan viskositas lelehan pada kondisi pengujian, meskipun viskositas material apapun bergantung pada beban yang dipakai. Perbandingan antara dua nilai indeks alir lelehan untuk satu material sering digunakan sebagai ukuran penyebaran distribusi berat molekul.

MFI biasa digunakan untuk poliolefin, polietilena diukur pada 190°C dan polipropilena pada 230°C. Pembuat plastik harus memilih material dengan indeks

lelehan yang tinggi sehingga ia dapat dengan mudah membentuk polimer dalam bentuk leleh menjadi bentuk yang diinginkan, tapi sebaliknya pilih yang indeks lelehan rendah sehingga kekuatan mekanis dari bentuk akhir polimer sesuai untuk penggunaannya.

MFI adalah indikator berat molekul dan berhubungan sebaliknya. Resin dengan MFI 50 g/10 menit mengindikasikan berat molekul yang lebih rendah daripada yang memiliki MFI 10 g/10 menit. Material dengan MFI tinggi mungkin lebih mudah diproses, tetapi sifat-sifat fisik yang berkaitan dengan berat molekul, seperti ketahanan impak, sering menurun.

Secara umum, MFI biasa digunakan sebagai spesifikasi penerimaan material oleh produsen dan juga sebagai alat untuk membandingkan resin-resin dari sumber yang berbeda. MFI juga punya banyak kegunaan pada kontrol kualitas. Tidak hanya variasi pada polimerisasi dan pencampuran dapat memengaruhi MFI dari resin yang datang, tapi juga sebagai indikator degradasi resin yang disebabkan oleh kondisi transportasi atau penyimpanan, atau pengeringan yang kurang bagus. Pengujian MFI secara teratur setelah pencetakan atau ekstrusi dapat membantu menunjukkan kondisi proses yang kurang tepat. MFI juga dapat menjadi indikator sederhana bagaimana penambahan bahan daur ulang memengaruhi kemampuan proses dan performa akhir dari resin asli.

Sebagai contoh, ada sebuah studi kasus: benda polikarbonat cetak retak ketika jatuh. Resin asli punya MFI sebesar 28.5 g/10 menit. Sampel dari benda-benda yang “bagus” dihancurkan dan diuji pada alat *melt indexer*. Sampel tersebut punya MFI 27, dalam toleransi ($\pm 30\%$). Tapi benda yang “bermasalah” menunjukkan nilai MFI 90. Dari bukti tersebut, diketahui bahwa bagian yang “buruk” tersebut terdiri dari sejumlah besar bahan daur ulang yang telah terdegradasi termal selama proses.

2.4.2. Pengujian Indeks Alir Lelehan

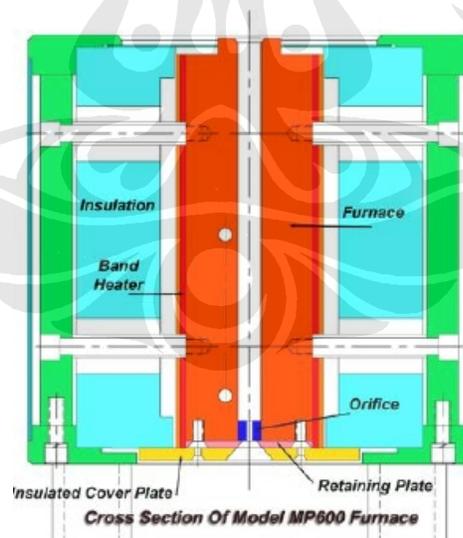
Pengujian indeks alir lelehan menggunakan suatu alat yang disebut *melt flow indexer/melt indexer*, atau dikenal juga sebagai *extrusion plastometer*. Alat ini sudah lama digunakan untuk menentukan indeks alir lelehan atau *Melt Flow*

Index (MFI) dari resin termoplastik asli atau campuran. Untuk memenuhi standar kualitas, lebih banyak produsen plastik yang menggunakan alat ini untuk mengevaluasi material yang datang dan menguji produk akhir.

Pengujian alir lelehan yang tercantum di ASTM D1238 dan ISO 1133 dengan cepat mengukur satu titik pada kurva viskositas di bawah kondisi standar. Alat *melt indexer* telah mengalami perubahan yang sangat tajam sejak kemunculannya di tahun 1950-an. Komputerisasi dan otomatisasi telah mengurangi variabel antar operator, dan mengeluarkan hasil dengan akurasi dan kemampuan uji ulang yang lebih tinggi.

Alat *melt indexer* terdiri dari rangkaian piston dan barel yang dipanaskan, seperti ilustrasi pada Gambar 2.13, untuk diisi oleh sampel resin. Beban tertentu diberikan pada piston, dan lelehan polimer keluar melalui *die* kapiler berdimensi tertentu.

Massa resin, dalam gram, yang keluar per 10 menit adalah nilai indeks alir lelehan, dalam satuan gram/10 menit. Beberapa alat juga dapat menghitung kecepatan *shear*, tegangan *shear*, dan viskositas dalam *centipoise*.



Gambar 2.13. Penampang tungku *melt indexer* [7]

Sifat dasar yang diukur pada pengujian indeks alir lelehan ini adalah viskositas lelehan pada tegangan *shear* (berhubungan dengan beban yang dipakai) dan temperatur tertentu. Rantai-rantai polimer yang pendek dan dengan geometri

sederhana saling “meluncur” satu sama lain dan memiliki sedikit ketahanan alir. Sebaliknya, rantai-rantai panjang dengan berat molekul tinggi dan dengan struktur yang lebih kompleks menghasilkan ketahanan alir dan viskositas yang lebih besar.

2.4.2.1. Prosedur Pengujian A

ASTM D1238/ISO 1133 memberikan dua variasi pengujian MFI standar, yaitu Prosedur A dan Prosedur B. Prosedur A menjelaskan *melt indexer* manual yang dasar. Prosedur ini mencakup pembuatan “*cut-off*” ekstrudat pada interval waktu tertentu ketika lelehan keluar dari *die* ekstrusi pada temperatur dan beban pengujian tertentu. *Cut-off* ditimbang untuk menentukan massa rata-rata dan nilai ini dikonversi ke massa yang akan keluar dalam 10 menit, itulah nilai MFI.

Beban pengujian berkisar dari 1.2 sampai 21.6 kg untuk mengukur material dengan rentang dari viskositas yang sangat rendah ke viskositas yang sangat tinggi. Semakin kental lelehan maka membutuhkan beban lebih berat untuk menekannya keluar dari *die*. Beban dan temperatur yang digunakan tergantung pada material dan metode pengujian.

Semua *melt indexer* terbaru sekarang dilengkapi dengan penghitung waktu otomatis, dan beberapa punya pemotong ekstrudat otomatis. Walaupun pemotong ekstrudat otomatis bekerja dengan baik pada beberapa plastik, beberapa lelehan resin bersifat lengket dan sulit untuk membuat potongan yang bersih dan dalam banyak kasus, pemotong otomatis tidak dapat menyamai tangan manusia.

2.4.2.2. Prosedur Pengujian B

Pengujian Prosedur B lebih sederhana karena tidak ada pemotongan ekstrudat atau penimbangan karena bersifat volumetrik. Volume resin yang diekstrusi didapat dari geometri barel dan jarak tempuh piston pada periode waktu tertentu. Cara ini menghasilkan yang disebut *Melt Volume Rate* (MVR) dalam satuan cc/10 menit. Dari nilai ini dan kepadatan lelehan resin yang sudah diketahui, MFI dapat dihitung secara otomatis. Dengan pengujian Prosedur B, operator hanya perlu mengisi barel dengan sampel, memulai pengujian, dan alat tersebut yang akan menghitung hasilnya.

Keuntungan pertama Prosedur B terhadap Prosedur A adalah prosedur ini mengukur 20, 30, atau 40 titik pengukuran dalam satu kali pengujian dan menghitung secara statistik mana hasil yang termasuk dalam rentang toleransi dan mana yang tidak karena gelembung udara atau pengotor yang lain. Keuntungan kedua adalah lebih sedikitnya campur tangan operator. Maka hasil akan lebih akurat dan lebih mampu diproses ulang.

Di sisi lain, pengujian Prosedur B memerlukan nilai akurat densitas lelehan resin pada temperatur pengujian. Nilai-nilai tersebut tersedia dalam literatur. Sebagai contoh, nilai untuk PE dan PP “generik” tertera di standar ASTM D1238. Tetapi, kebanyakan sumber menganggap lebih akurat bila mengukur densitas lelehan aktual dari resin yang sedang diuji. Ini dilakukan dengan menggabungkan elemen-elemen Prosedur A dan B dalam satu pengujian untuk mendapatkan data berat dan volume-kemudian didapat densitas. *Melt indexer* Prosedur B sekarang dapat digunakan untuk menjalankan kedua pengujian tersebut.

