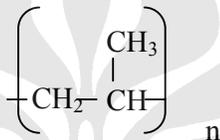


BAB II

LANDASAN TEORI

II.1 POLIPROPILENA

Polipropilena merupakan sebuah polimer hidrokarbon linier hasil reaksi polimerisasi dari propilena (C_nH_{2n}) seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur polipropilena.

Polipropilena (PP), seperti polietilena dan polibutena, adalah suatu jenis polimer alifatik jenuh (rantai lurus, tanpa ada ikatan rangkap pada atom karbon) dari golongan poliolefin yang berasal dari gas hasil pemecahan (*cracking*) minyak bumi. Polipropilena merupakan salah satu polimer yang paling tahan kondisi yang digunakan sebagai plastik dan serat.

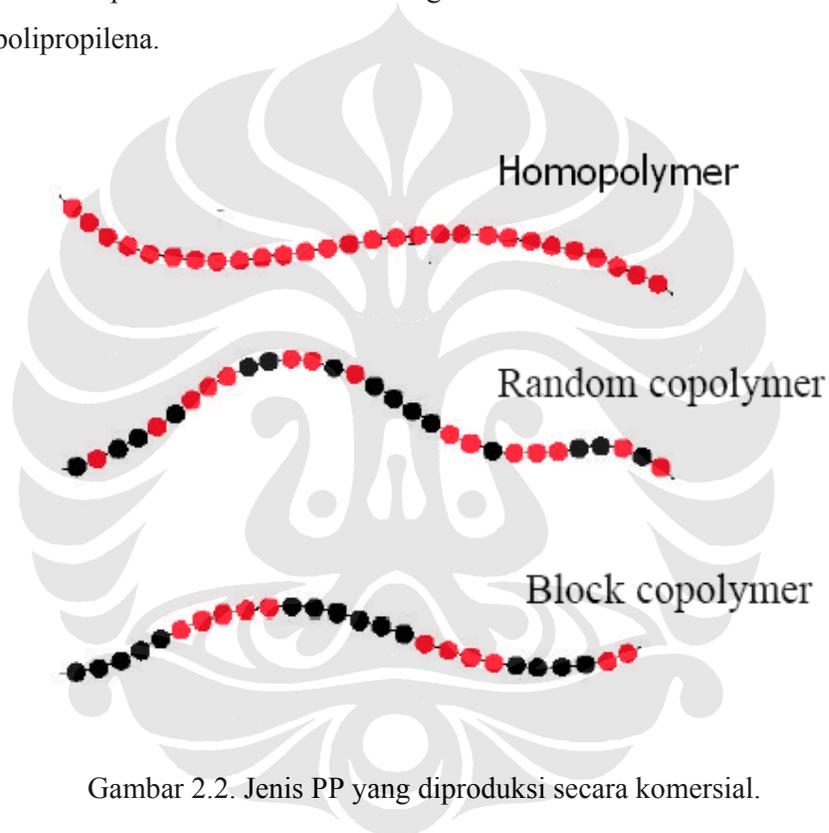
PP juga termasuk polimer semikristalin, yang mana terdiri dari campuran dua bagian, yaitu fasa kristalin dan amorf. Fasa kristalin adalah bagian di mana rantai-rantai molekul PP tersusun secara teratur, sedangkan fasa amorf adalah bagian di mana rantai-rantai molekul tersusun secara acak dan tidak beraturan. Fasa kristalin merupakan fasa dengan berat jenis lebih berat dibandingkan dengan fasa amorf. Fasa kristalin memberikan kekuatan, kekakuan, dan kekerasan pada PP, namun di sisi lain fasa kristalin juga menyebabkan PP menjadi lebih getas. Pada penggunaan komersial umumnya PP memiliki derajat kristalinitas yang tinggi karena memiliki 95–98 % fasa isotaktik dan 2–5 % fasa ataktik.

Sebagai polimer semikristalin, PP memiliki dua temperatur transisi, yaitu temperatur transisi gelas (**T_g**) dan temperatur leleh (**T_m**). Temperatur transisi gelas adalah temperatur di mana terjadi perubahan fasa dari fasa *glassy* atau *rigid*

(kaku) menjadi fasa *rubbery* (kekaretan, lentur), sedangkan temperatur leleh adalah temperatur di mana PP mulai meleleh menjadi lelehan kental.

II.1.1 Jenis Polipropilena

Polipropilena yang diproduksi secara komersial dan beredar di pasaran dapat digolongkan ke dalam tiga jenis yaitu: homopolimer, kopolimer acak, dan kopolimer impak. Etilena biasanya digunakan sebagai komonomer untuk membentuk kopolimer. Gambar 2.2 mengilustrasikan bentuk molekul dari ketiga jenis polipropilena.



Gambar 2.2. Jenis PP yang diproduksi secara komersial.

II.1.1.1 Homopolimer (*homopolymer*)

Polimer ini hanya terdiri dari satu macam monomer yaitu propilena. Polimer ini memiliki kuat tarik, kekakuan, ketahanan panas dan kekuatan yang tinggi sehingga cocok untuk digunakan dalam berbagai aplikasi seperti film plastik, *injection molding*, *sheet thermoforming*, *yarn*, dan *fiber multifilament*. Homopolimer yang digunakan untuk setiap aplikasi memiliki sifat fisik yang

berbeda-beda pula, dan dipasar dikenal bermacam-macam grade antara lain grade film, grade yarn, grade *injection molding* dan grade ekstrusi.

II.1.1.2 Kopolimer acak (random copolymer)

Pada saat pembuatan polipropilena, 1-7 %berat monomer etilena ditambahkan ke dalam monomer propilena secara simultan ke dalam reaktor. Penambahan molekul etilena ini mengakibatkan berkurangnya kristalinitas polipropilena dengan butiran *spherulite* yang lebih kecil dan lebih jernih. Hal ini menghasilkan kekuatan dan transparansi yang lebih baik dibandingkan homopolimer. Komonomer pada polipropilena termodifikasi yang paling banyak dijumpai adalah etilena.

II.1.1.3 Kopolimer blok (block copolymer)

Polimer ini diproduksi dalam dua reaktor di mana reaktor pertama untuk pembentukan homopolimer dan diikuti reaktor kedua untuk pembuatan propilena-etilena *rubbery*. Kopolimer impak ini bersifat insulator, tidak tembus cahaya, memiliki kekakuan yang tinggi, ketahanan terhadap tumbukan yang cukup baik pada temperatur rendah (-20 °C). Kopolimer impak banyak digunakan pada *injection molding*, *extruded sheet*, dan *thermoforming*.

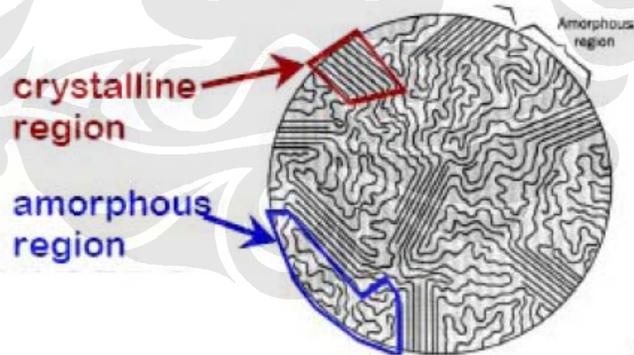
II.1.2 Kristalinitas polipropilena

Secara fisik, struktur molekul polimer dibagi menjadi tiga klasifikasi yaitu: struktur kristalin, amorf dan semikristalin. Polipropilena merupakan polimer yang berstruktur semikristalin. Tabel 2.1 memperlihatkan struktur semikristalin mempunyai sifat mekanik yang berada di tengah-tengah sifat amorf dan kristalin, sehingga memiliki beberapa keuntungan untuk aplikasi yang luas.

Tabel 2.1. Perbandingan struktur kristalin, amorf dan semikristalin

	Kristalin	Amorf	Semikristalin
Densitas	Tinggi	Rendah	Medium
% Cristal	Tinggi	Rendah	Medium
Kuat impak	Rendah	Tinggi	Medium
Kekakuan	Tinggi	Rendah	Medium
Suhu transisi	Temperatur leleh	Transisi gelas	Transisi gelas dan Temperatur leleh
Contoh	Aramid	PS, PVC, PC.	PP, PE, PET, Nilon

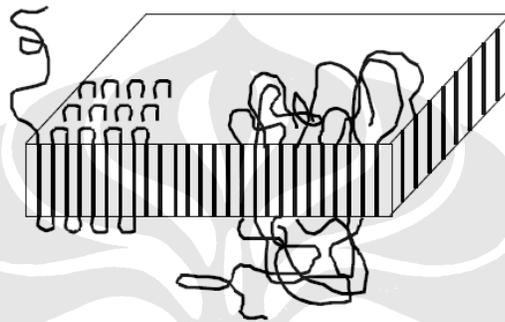
Polipropilena umumnya terdiri dari struktur kristal yang membaaur dengan struktur amorf. Polimer dapat membentuk kristal apabila memiliki kemampuan untuk menyusun rantai molekul dengan teratur. Struktur linier dan isotaktik cenderung membentuk fasa kristalin karena memiliki kemampuan menyusun molekul polimer dengan teratur. Di lain pihak, struktur ataktik dan struktur cabang mempunyai kecenderungan membentuk struktur amorf. Polipropilena yang dijual secara komersil lebih banyak berstruktur isotaktik, sehingga cenderung membentuk struktur semikristalin. Gambar 2.3 memperlihatkan ilustrasi struktur kristal dan amorf dalam 2 dimensi.



Gambar 2.3. Struktur kristalin dan amorf berdasarkan teori *fringed micelle*.^[1]

Inti kristal terbentuk ketika beberapa segmen molekul polimer mengatur diri pada arah yang sama dan membentuk kisi (susunan) secara beraturan. Pembentukan inti kristal ini mulai terjadi pada temperatur kristalisasi. Berawal dari pembentukan inti, kristalisasi tumbuh membentuk lamela atau lembaran-lembaran yang terdiri dari fasa kristalin dan amorf. Lamela merupakan susunan

terlipatan (*folded-chain*) molekul polimer yang mengatur diri, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.4. Lamela akan tumbuh terus-menerus dengan arah pertumbuhan yang beragam sehingga membentuk *spherulite*, untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2.5 dan Gambar 2.6. Suatu molekul polimer yang memiliki *spherulite* yang berukuran besar akan mempunyai sifat yang berbeda dengan molekul polimer yang memiliki *spherulite* ukuran kecil.

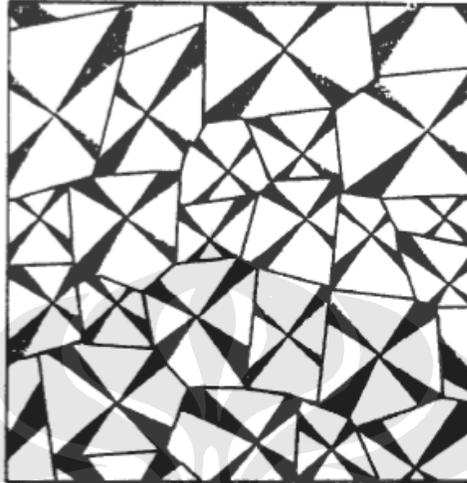


Gambar 2.4. Lamela dengan susunan *folded* molekul polimer yang teratur/kristalin (di sebelah kiri) dan yang tidak teratur/amorf (di sebelah kanan).^[2]

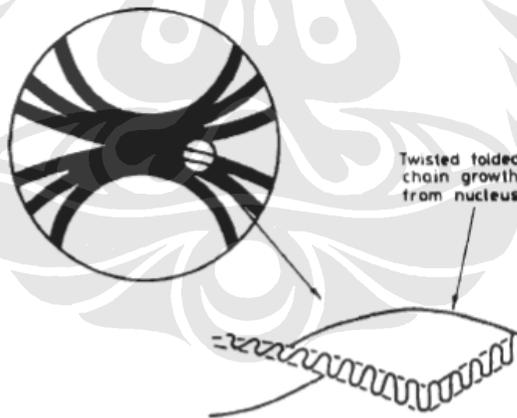
Salah satu perbedaan sifat yang dipengaruhi ukuran *spherulite* adalah sifat optik. Pada umumnya polipropilena bersifat *opaque* (tak tembus cahaya), hal ini diakibatkan adanya perbedaan indek refraksi antara fasa kristalin dengan amorf sehingga cahaya dihamburkan. Namun jika ukuran *spherulite* lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya, cahaya tidak akan terhambur dan polimer bersifat transparan.^[3]

Kecepatan pertumbuhan *spherulite* akan mencapai maksimum pada temperatur sedikit di bawah temperatur leleh. Pada dasarnya, pertumbuhan kristal akan terus berlangsung sampai kestabilan tercapai pada saat temperatur di atas temperatur transisi gelas. Produk polimer yang mempunyai temperatur transisi gelas di bawah temperatur ruangan seperti polipropilena, akan terjadi perubahan dimensi (*shrinkage*) sampai batas tertentu. Semakin rendah temperatur transisi gelas maka kestabilan akan cepat tercapai dan begitu juga sebaliknya. Untuk mengontrol perubahan dimensi ini, pada proses produksi suatu produk polimer

dilakukan proses pemanasan (*annealing*). Proses *annealing* ini mempercepat mencapai kestabilan pada molekul polimer.



Gambar 2.5. *Spherulite* yang berukuran besar akan mempunyai sifat yang berbeda dengan molekul polimer yang memiliki *spherulite* ukuran kecil.^[4]



Gambar 2.6. Lamela akan tumbuh terus-menerus dengan arah pertumbuhan yang beragam sehingga membentuk *spherulite*.^[5]

Kristalinitas memberikan pengaruh yang besar terhadap sifat mekanik polipropilena. Semakin tinggi kristalinitas polimer maka kepadatan, kekerasan, kekakuan dan kekuatan tarik meningkat. Di samping itu, kristalinitas memberikan ketahanan terhadap temperatur.

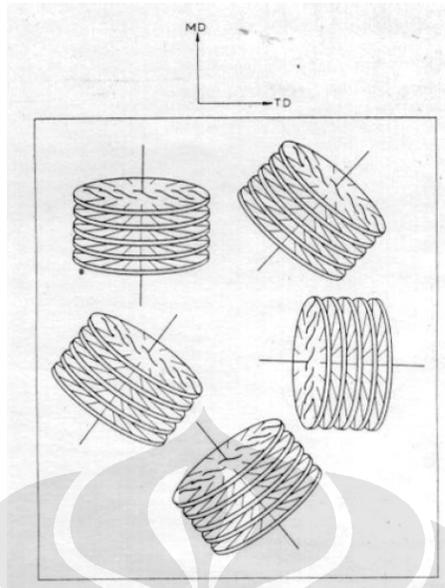
II.1.3 Proses fabrikasi PP

Polipropilena dapat diproses dengan berbagai macam metoda, antara lain *injection molding*, *ekstrusi*, *yarn*, dan *blow molding*. Film plastik yang dibahas pada penelitian ini, dibuat melalui proses ekstrusi. Kemudian ekstrudat ditarik pada arah MD (*Machine Direction*) dan TD (*Transverse Direction*), karena ditarik pada kedua arah maka dinamakan BOPP (*Biaxial Oriented Polypropylene*). Sedangkan, metoda *injection molding* menghasilkan produk-produk dalam bentuk profile. *Blow molding* menghasilkan produk berlubang seperti botol, dan metoda *yarn* menghasilkan produk benang seperti karung dan tali plastik.

II.2 FILM PLASTIK BOPP

BOPP (*Biaxial Oriented Polypropylene*) film adalah film plastik yang ditarik pada kedua arah, tegak lurus arah mesin (*transverse direction*) maupun searah mesin (*machine direction*). Penarikan ini menghasilkan rantai molekul yang terorientasi. BOPP film dibuat dengan proses tubular atau *flat dies* dibantu frame perentang (*tenter frame*). Lembaran ekstrudat yang terbentuk dipanaskan hingga titik *softening point* dan ditarik pada kedua arah hingga 300—400 %. Penarikan kedua arah meningkatkan ketangguhan, meningkatkan kekakuan, menambah kejernihan, meningkatkan sifat barrier serta memperbaiki sifat impak.

Penarikan searah MD (*Machine Direction*) dan TD (*Transverse Direction*), seperti Gambar 2.7, menyebabkan rantai molekul tertarik sehingga dapat menginduksi pembentukan struktur kristal dengan butir kecil pada arah MD dan TD. Pada saat penarikan searah MD (*Machine Direction*) dan TD (*Transverse Direction*), struktur molekul akan terorientasi pada kedua arah tarikan dan pertengahan kedua arah. Bentuk struktur kristal yang terorientasi ini akan meningkatkan kejernihan, kekuatan tarik, kekuatan sobek pada kedua arah. Selain itu, ketahanan terhadap gas dan uap (*barrier properties*) meningkat.



Gambar 2.7. Ilustrasi struktur molekul polimer yang terorientasi saat penarikan searah MD (*Machine Direction*) dan TD (*Transverse Direction*).^[6]

BOPP film dapat berfungsi sebagai film mampu susut (*shrinkable film*) atau *heat set* untuk menjaga stabilitas dimensi. Perbedaan *shrinkable film* dengan *heat set* terletak pada proses pemanasan (*annealing*) setelah film terbentuk. Produk *heat set*, seperti Gambar 2.8, melewati proses *annealing* sehingga kemampuan susut dari material semikristalin berkurang, sehingga dimensi film lebih stabil. Proses *annealing* merupakan proses pelepasan tegangan (*relaxation*) yang mengakibatkan penyusutan (*shrinkage*). Proses *annealing* ini bertujuan mempercepat mencapai kestabilan pada molekul polimer, sehingga plastik ini tidak mempunyai sifat susut (*shrinkable*) yang tinggi dalam aplikasinya.



Gambar 2.8. Contoh aplikasi BOPP *Heat set*.^[7]

Sedangkan untuk *shrinkable film* tidak melewati proses *annealing*. Selain itu, BOPP dapat digunakan sebagai penyegel dengan bantuan panas (*heat sealing*), namun agak sulit untuk polipropilena sehingga harus dilapisi dengan *heat-sealable* material seperti *polyvinylidene chloride* dengan proses co-ekstrusi. Proses co-ekstrusi merupakan penggabungan dua atau lebih kopolimer untuk membentuk lapisan film. Kopolimer yang digunakan sebagai lapisan penyegel (*sealing*) harus memiliki sifat kilap (*gloss*) dan jernih (*clarity*) yang tinggi, serta memiliki temperatur *sealing* yang rendah untuk mencegah distorsi pada lapisan lain.

Random kopolimer mengandung 3—7 % etilena lebih sering digunakan sebagai lapisan *sealing*. Material ini dapat didaur ulang tanpa kehilangan sifat kejernihan dan kekuatan yang signifikan. Pelapisan atau co-ekstrusi meningkatkan sifat barrier dan menurunkan permeabilitas dari gas. Pada Tabel 2.2 disajikan sifat-sifat dari *unaxial* dan *biaxial oriented* dengan sampel film PP berasal dari novolen (BASF).

Tabel 2.2. Sifat mekanik *unaxial* dan *biaxial oriented* film polipropilena

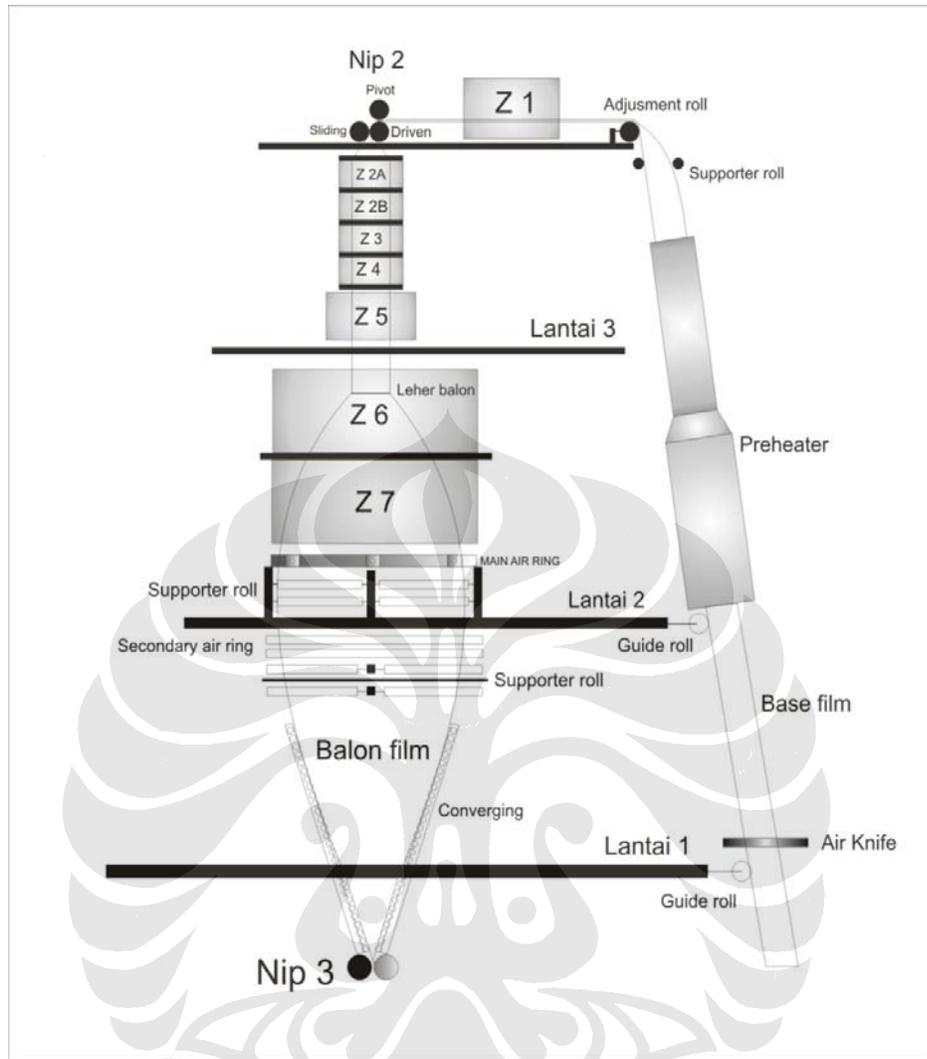
Sifat	Standard ASTM	<i>Unaxial oriented</i>	<i>Biaxial oriented</i>
Spesifik gravitasi, g/cc	D1505	0,885—0,905	0,902—0,907
Kuat tarik, psi	D882	4500—7000	7500—40.000
Elongasi, %	D882	550—1000	35—475
Kuat sobek, g/mil	D1922	25 MD 600 TD	3—10
Daya tahan lipat (fold endurance)	D2176	Tinggi	Sangat baik
Water Vapor Transmission Rate g/mil/100 in ² /24 jam @100 °F	E96	0.7	0.25
Permeabilitas oksigen	D1434	150—240	-
Gloss, %		90	95
Haze, %	-	1—2	1—2

Sumber : Plastics Design Library, William Andrew Inc.

II.2.1 Proses tubular BOPP film

Proses tubular film meliputi: ekstrusi, proses pembuatan *tube* dari cetakan, penarikan ekstrudat *tube* dengan penambahan tekanan dari dalam (ditiup) dan ditarik pada waktu bersamaan. Dari penelitian yang telah ada, diketahui bahwa PP film kurang stabil dibandingkan dengan PE film. Oleh karena itu, kebanyakan industri BOPP menggunakan metoda dua balon tubular (*double bubble*) film sehingga balon yang terbentuk akan lebih stabil.

Lelehan PP yang keluar dari ekstruder didinginkan sehingga membentuk *tube*, kemudian dipanaskan kembali untuk dilakukan penarikan dengan peniupan dan penarikan pada waktu bersamaan. penarikan searah MD (*Machine Direction*) disebabkan oleh perbedaan kecepatan antara rol yang menarik ekstrudat. Sedangkan penarikan searah TD (*Transverse Direction*) diakibatkan oleh *blow up ratio* atau perbandingan antara diameter balon kedua dengan balon pertama. Namun, penarikan searah TD juga terjadi akibat perbedaan diameter balon pertama dan diameter cetakan. Perbandingan antara diameter balon dengan diameter cetakan (*blow up ratio*) cukup besar. Nilai *blow up ratio* hampir sama dengan *take up ratio* seperti terlihat pada Gambar 2.9.

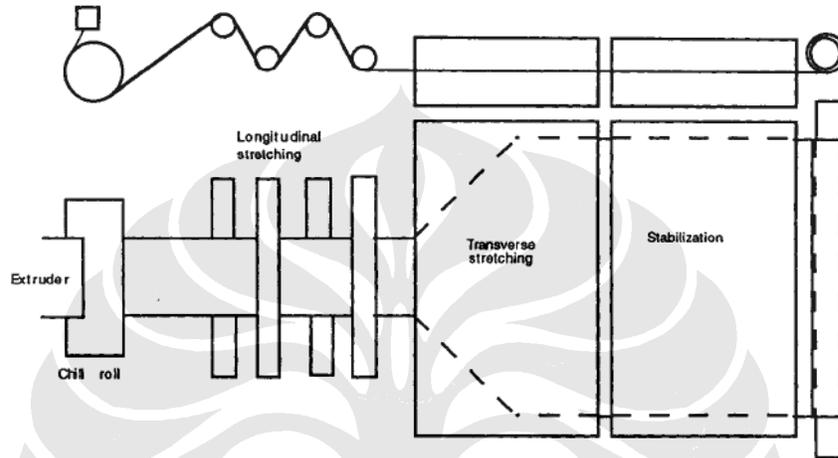


Gambar 2.9. Pembentukan balon film metode *double bubble*.

II.2.2 Proses BOPP film lembaran

Proses pembuatan BOOP film lembaran merupakan salah satu proses pembuatan BOPP yang paling banyak digunakan karena prosesnya lebih stabil dibandingkan dengan proses tubular. Dengan bantuan frame perentang, film ditarik searah MD dan TD. Ekstruder menghasilkan lehan polimer untuk dicetak menjadi film lembaran. Bentuk cetakan biasanya *coat-hanger* yang mempunyai pengaturan ketebalan (*adjustment lips*) sehingga kecepatan aliran dapat diatur. Kecepatan rol yang konstan menyebabkan lehan film di tarik searah MD. Pada rol terdapat

sirkulasi air yang berfungsi sebagai media pendingin pada rol. Rol dengan temperatur rendah (*chill roll*) akan menarik film sekaligus menurunkan temperatur film secara tiba-tiba (*quench*). Frame peregang menarik film searah TD seperti Gambar 2.10. Proses ini akan berakhir dengan proses *annealing* dan penggulangan.



Gambar 2.10. Proses pembuatan BOPP dengan metoda frame perenggang.^[8]

Pada metoda lembaran, proses penarikan searah MD dan TD tidak dilakukan secara bersamaan. Akibatnya, terjadi relaksasi hasil penarikan yang pertama pada penarikan kedua. Efek dari penarikan pertama yaitu searah MD, akan berkurang akibat penarikan kedua yaitu TD. Penarikan kedua memberikan efek relaksasi terhadap penarikan MD. Sehingga untuk mendapatkan sifat isotropik, rasio penarikan MD lebih besar dari penarikan searah TD. Keuntungan dari metoda *cast film* adalah hasil film dengan keragaman ketebalan yang relatif kecil, tetapi produktivitas lebih kecil dibandingkan dengan tubular film.

II.2.3 Struktur dan orientasi

Seperti yang telah dibahas pada Sub Bab sebelumnya, sifat mekanis dan optik dari PP tergantung pada morfologi dari struktur kristal. Besar, kesempurnaan dan banyaknya *spherulite* memberikan sifat optik dan mekanis yang berbeda. Sedangkan, sejarah perlakuan seperti deformasi dan pendinginan memberikan

efek pada *spherulite*. Orientasi molekul merupakan kunci utama dalam menghasilkan sifat mekanis pada BOPP. Banyak teknik digunakan untuk melihat karakteristik dari orientasi molekul ini, seperti menggunakan *X-ray scattering*, *infrared spectroscopy* dll. Maka dapat disimpulkan proses pendinginan (*quenching*), penarikan dan *annealing* memberikan suatu sifat yang khas dari film plastik BOPP.

Pendinginan secara tiba-tiba (*quenching*) pada proses BOPP menyebabkan molekul pada keadaan metastabil. Proses *quenching* menyebabkan tegangan sisa yang terbentuk akibat ketidakteraturan molekul yang terbentuk. Molekul tidak sempat mengatur diri akibat pendinginan sehingga menimbulkan tegangan sisa. Ketidakteraturan ini bertambah pada saat penarikan searah MD dan TD. Dengan meningkatkan BUR (*Blow Up Ratio*) atau TUR (*Take Up Ratio*) atau keduanya, ketidakteraturan molekul bertambah.

II.2.4 Sifat film BOPP

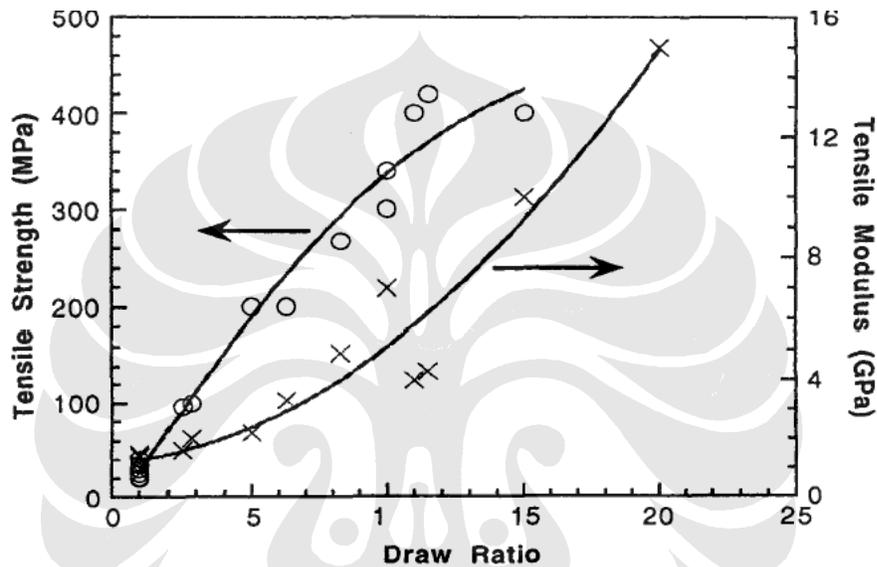
II.2.4.1 Sifat optik

Tingkat keburaman (*haze*) adalah ukuran keburaman dari film yang disebabkan oleh terhamburnya cahaya yang dipantulkan. Hamburan cahaya ini dapat diakibatkan oleh kekasaran dan inhomogenitas pada film. Kekasaran (*roughness*) dalam beberapa studi memperlihatkan hubungannya dengan kristalisasi pada polimer. Pada tubular film, *haze* meningkat seiring dengan bertambahnya panjang *forst line* dan menurunnya TUR dan BUR. Distribusi berat molekul yang sempit juga meningkatkan *haze*. Pada proses film lembaran, sifat transparan berkurang seiring temperatur pendinginan meningkat dan hal tersebut akan meningkat jika rasio penarikan bertambah. Secara umum, *haze* akan berkurang jika rasio orientasi bertambah dan temperatur pendinginan rendah.

Kilap (*gloss*) adalah kemampuan memantulkan sinar yang datang. Pada proses BOPP, temperatur penarikan antara 150—160 °C dapat mengakibatkan penurunan sifat kilap. Rasio penarikan 6 merupakan nilai optimum dari penarikan MD dan TD. Di atas atau di bawah nilai 6, sifat kilap menurun.

II.2.4.2 Sifat mekanis

Sifat mekanis dari suatu material digambarkan dalam suatu kurva tegangan-regangan. Pada Gambar 2.11 memperlihatkan kuat tarik dan modulus terhadap rasio penarikan. PP yang tidak mengalami penarikan mempunyai modulus sekitar 1.3 Gpa dan kuat tarik sekitar 30 Mpa. Nilai tersebut terus meningkat seiring dengan bertambahnya rasio penarikan (*draw ratio*).



Gambar 2.11. Grafik kuat tarik dan modulus tarik terhadap rasio penarikan.^[9]

Distribusi berat molekul memberikan sedikit efek terhadap sifat mekanis. Semakin lebar distribusi berat molekul, kuat tarik dan modulus sedikit meningkat sedangkan elongasi dan penyusutan (*shrinkage*) sedikit menurun. Hal tersebut diakibatkan oleh berkurangnya pergerakan molekul dan meningkatnya molekul yang terkunci (*tie molecules*) pada distribusi berat molekul yang lebar.

II.2.4.3 Sifat susut (*shrinkage*)

Proses *annealing* bertujuan untuk mengurangi sifat mampu susut plastik film. Pada beberapa studi memperlihatkan rasio penarikan searah TD dan temperatur penarikan mempengaruhi kemampuan susut dari film plastik. Misalnya, penyusutan akan berkurang dari 12 % ke 5 %, ketika temperatur penarikan

ditingkatkan dari 135 °C ke 160 °C. Dalam beberapa kasus, penyusutan di bawah 4 % sulit untuk dicapai.

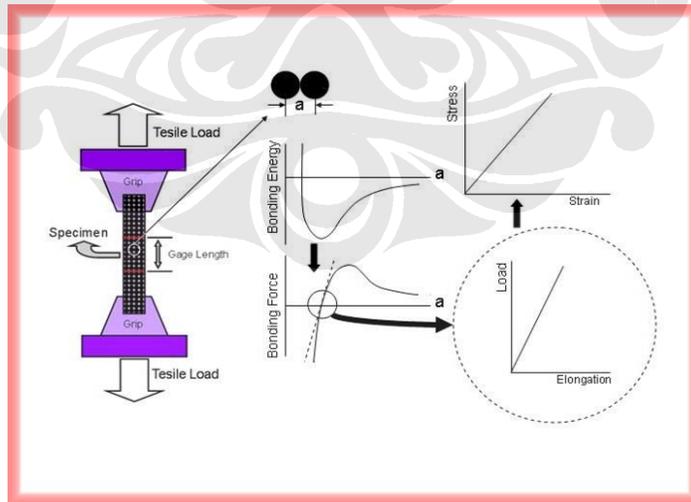
II.3 SIFAT TARIK MATERIAL

Pengujian tarik merupakan pengujian mekanis berupa gaya tarik untuk melihat perilaku inheren dari material terhadap pembebanan tersebut. Informasi yang didapat pada pengujian tarik seperti :

1. Tegangan luluh (*yield point*)
2. UTS (*Ultimate Tensile Strength*)
3. Persentase elongasi saat gagal atau putus
4. Modulus elastis
5. Perilaku material saat deformasi plastik

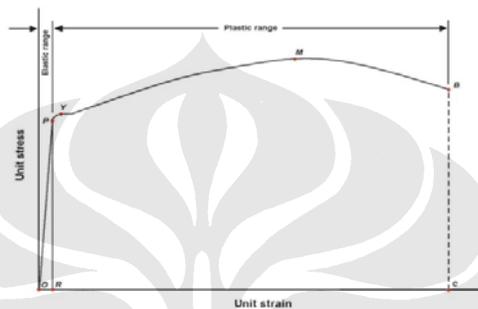
Mekanisme pembebanan pada pengujian tarik secara skala atomik terbagi dua seperti pada Gambar 2.12, yaitu:

1. *elastic deformation*, merupakan *stretching* dari ikatan atom-atom
2. *plastic deformation*, merupakan akibat dari distorsi dan pembentukan ulang dari ikatan atom



Gambar 2.12. Skematik hubungan uji tarik pada skala atom. Mekanisme ini terbagi menjadi dua, yaitu deformasi elastik dan plastik.

Prinsip pengujian tarik yaitu dengan memberikan tegangan aksial berupa tarikan pada kedua ujung atau salah satu ujung spesimen tarik hingga putus seperti pada Gambar 2.12. Panjang ukur (*gauge length*) adalah daerah di bagian tengah dimana elongasi diukur atau alat extensometer diletakkan untuk pengukuran. Data yang didapat dari pengujian tarik berupa kurva tegangan-regangan, seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Kurva tegangan-regangan.

Dari kurva pada Gambar 2.13, kita dapat melihat nilai modulus elastik, tegangan luluh, tegangan maksimum dan sifat material secara umum. Hasil pengujian tarik akan memperlihatkan suatu sifat tarik dari suatu material. Data yang didapatkan dari pengujian tarik akan menjadikan suatu dasar pengembangan dan penelitian lebih lanjut, juga menjadi dasar dari kontrol kualitas dan spesifikasi. Sifat tarik pada suatu material dapat dipengaruhi oleh ketebalan spesimen, metoda persiapan sampel, kecepatan tarik, jenis pemegang sampel dan metoda perhitungan perpanjangan.

1. Ketebalan sampel

Ketebalan sampel akan mempengaruhi sifat mekanis tarik dari film plastik. Semakin tebal film plastik, semakin tinggi nilai gaya tarik untuk memperoleh kekuatan tarik yang sama.

2. Metoda persiapan sampel

Sampel yang dipersiapkan untuk pengujian harus bebas dari konsentrasi tegangan. Jika terdapat konsentrasi tegangan, maka akan terjadi beban sobek (*tearing*).

Beban *tearing* yang terjadi tidak dapat dimasukkan sebagai sifat tarik film plastik. Tegangan konsentrasi dapat diakibatkan dari bentuk pingiran spesimen yang tidak konsisten.

3. Pemegang (*Grips*)

Gripping sistem harus dapat meminimalisir slip dan distribusi konsentrasi yang tidak seragam, pemegang terdiri dari 2 sistem yaitu pemegang tetap (*fixed grips*) dan pemegang bergerak (*moveable grips*). Pada saat pengujian, spesimen harus dalam keadaan terjepit di kedua pemegang. Letak spesimen juga sejajar dengan arah penarikan, sehingga tidak ada gerakan putar. Gerakan putar yang disebabkan tidak sejajarnya spesimen terhadap arah penarikan akan meningkatkan slip pada daerah gengaman (*grip area*).

II.3.1 Sifat mekanik material

II.3.1.1 Batas proporsionalitas (*proportionality limit*)

Merupakan daerah batas dimana tegangan dan regangan mempunyai hubungan proporsional satu dengan lain. Setiap penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan regangan secara proporsional dalam hubungan linier. Pada Gambar 2.13, titik P merupakan batas proporsionalitas.

$$\delta = E \cdot \epsilon \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

δ = Intensitas gaya internal (tekanan)

ϵ = Elongasi per unit panjang

E = modulus elastik

II.3.1.2 Batas elastis (*elastic limit*)

Pengertian elastis adalah bahan akan kembali kepada panjang semula bila tegangan luar dihilangkan. Daerah proporsionalitas merupakan bagian dari batas elastik. Maka batas elastis merupakan titik dimana tegangan yang diberikan akan menyebabkan terjadinya deformasi plastis untuk pertama kalinya. Kebanyakan

material teknik mempunyai batas elastis yang hampir berhimpitan dengan batas proporsionalitasnya.

II.3.1.3 Titik luluh (*yield point*) dan kekuatan luluh (*yield strength*)

Titik dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan (*stress* yang mengakibatkan bahan menunjukkan mekanisme luluh ini disebut tegangan luluh (*yield stress*).

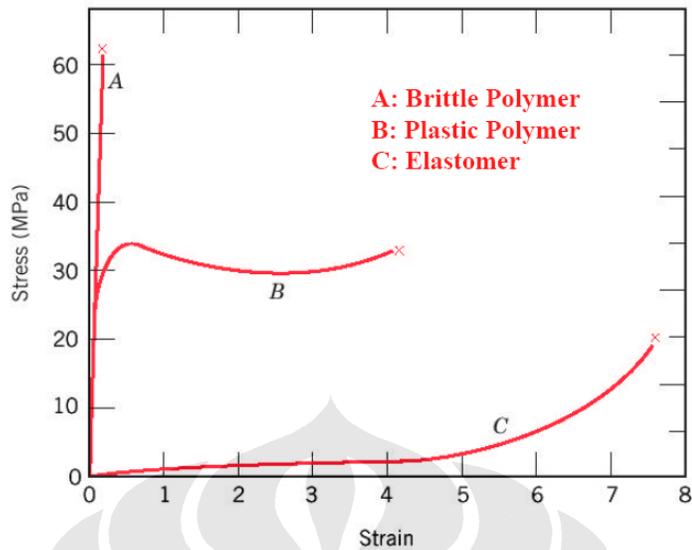
Kekuatan luluh atau titik luluh merupakan suatu gambaran kemampuan bahan menahan deformasi permanen bila digunakan dalam penggunaan struktural yang melibatkan pembebanan mekanik seperti tarik, tekan, bending atau puntiran.

II.3.1.4 Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

UTS (*Ultimate Tensile Strength*) adalah tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*). Nilai kekuatan tarik maksimum ditentukan dari beban maksimum dibagi luas penampang. Kuat tarik dari beberapa material dapat berbeda-beda, tergantung sifat mekanis yang dimilikinya seperti pada Gambar 2.14.

$$\delta_{UTS} = F_{maks}/A_0 \dots \dots \dots (2.2)$$

Satuan SI dari kekuatan tarik maksimum (UTS) adalah megapaskal (MPa).



Gambar 2.14. Kurva tegangan dan regangan beberapa material.

II.3.1.5 Kekuatan putus (*breaking strength*)

Kekuatan putus ditentukan dengan membagi beban pada saat benda uji putus ($F_{breaking}$) dengan luas penampang awal (A_0).

$$\delta_{putus} = F_{putus} / A_0 \dots\dots\dots(2.3)$$

Untuk bahan yang bersifat ulet seperti thermoplastik pada saat beban maksimum terlampaui dan bahan terus terdeformasi hingga titik putus, maka terjadi mekanisme penciutan (*necking*) sebagai akibat adanya suatu deformasi yang terlokalisasi.

Pada bahan ulet, kekuatan putus lebih kecil dari kekuatan maksimum, dan pada bahan getas kekuatan putus sama dengan kekuatan maksimumnya.

II.3.1.6 Keuletan (*ductility*)

Keuletan adalah kemampuan material menahan deformasi hingga terjadinya perpatahan. Pengujian tarik memberikan dua metode pengukuran keuletan bahan yaitu:

- **Persentase perpanjangan (elongation) :**

$$\varepsilon (\%) = [(L_f - L_0)/L_0] \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana: L_f = panjang akhir benda uji

L_0 = panjang awal benda uji

- **Persentase reduksi penampang (area reduction) :**

$$R (\%) = [(A_f - A_0)/A_0] \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana: A_f = luas penampang akhir

A_0 = luas penampang awal

II.3.1.7 *Modulus elastisitas (modulus Young)*

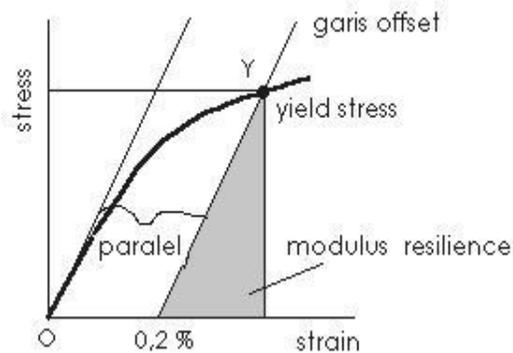
Modulus elastis merupakan ukuran kekakuan suatu material. Semakin besar harga modulus ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi, atau semakin kaku.

Pada grafik tegangan-regangan, modulus kekakuan dihitung dari kemiringan (*gradien*) garis elastis yang linier, diberikan oleh:

$$E = \delta/\varepsilon \dots\dots\dots (2.6)$$

II.3.1.8 *Modulus kelentingan (modulus of resilience)*

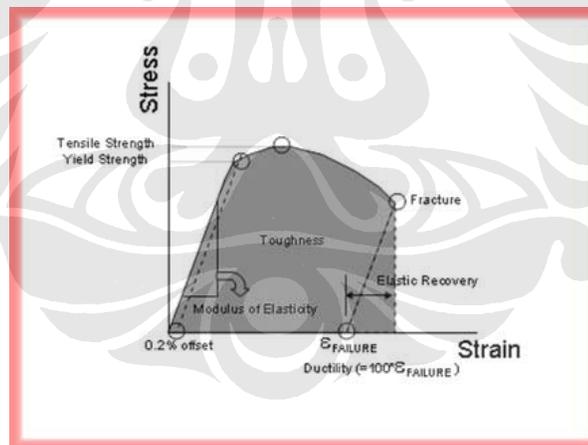
Modulus kelentingan adalah kemampuan material untuk menyerap energi dari luar tanpa terjadinya kerusakan. Nilai modulus dapat diperoleh dari luas segitiga yang dibentuk oleh *area elastik* diagram tegangan-regangan seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Memperlihatkan daerah *modulus resilience*.

II.3.1.9 *Modulus ketangguhan (modulus of toughness)*

Modulus ketangguhan merupakan kemampuan material dalam mengabsorb energi hingga terjadinya perpatahan. Secara kuantitatif dapat ditentukan dari luas area keseluruhan di bawah kurva tegangan-regangan hasil pengujian tarik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.

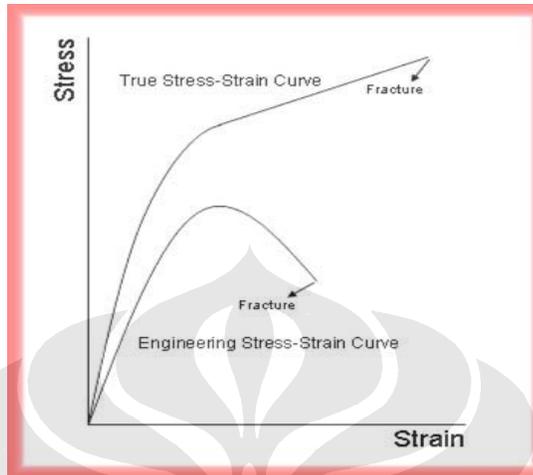


Gambar 2.16. Besarnya ketangguhan dapat dilihat dari luas daerah dibawah kurva tegangan dan regangan.

II.3.1.10 *Kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya*

Kurva tegangan-regangan rekayasa didasarkan atas dimensi awal (luas area dan panjang) dari benda uji, sementara untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan seungguhnya diperlukan luas area dan panjang aktual pada saat pembebanan

setiap saat terukur. Gambar 2.17 memperlihatkan perbedaan kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya.



Gambar 2.17. Perbandingan kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya.

II.4 MESIN UJI LFPLUS SERIES DIGITAL

Laboratorium Polimer Departemen Teknik Metalurgi dan Material memiliki mesin uji LFPlus Series Digital dengan kapasitas sampai 1 kN, sehingga cocok digunakan untuk pengujian film plastik. Tabel 2.3 memperlihatkan spesifikasi dari mesin LFPlus Series.

Tabel 2.3. Spesifikasi mesin uji LFPlus Series Digital Testing

Parameter	Keterangan
Kapasitas	1 kN
Kecepatan	0.05—1270 mm/min
Akurasi kecepatan	< 0.2%
Resolusi ekstensi	<1,3 μ m
Panjang daerah pengujian	500 mm
Kecepatan transfer data	8 kHz
Layar	LCD
Input/output	RS232 data serial
Energi	115/230 V
Sistem pengukuran	ISO 7500:1999
Berat	46 Kg

Sumber : User manual LFPlus Universal Test Machine, AMETEK Inc.

Mesin uji multitester ini dapat langsung dikoneksikan pada komputer, sehingga pengaturan pengujian dan pengolahan data dapat dilakukan pada komputer. Dengan bantuan program **Nexygen**, seluruh pengujian dapat dilakukan dengan mudah. Namun jika tidak dikoneksikan dengan komputer, alat ini juga memiliki konfigurasi pengaturan pengujian yang mudah diatur sesuai dengan permintaan. Alat uji ini terdiri dari beberapa bagian yang penting diantaranya:

1. Crosshead

Crosshead merupakan sistem penarik beban yang dapat bergerak turun-naik. Pada pengujian sampel, kecepatan *crosshead* perlu diperhatikan sesuai dengan spesifikasi sampel uji. Untuk sampel yang mempunyai elongasi yang kecil, maka kecepatan *crosshead* rendah. Hal ini dapat meningkatkan sensitifitas alat uji untuk membaca setiap perubahan pada sampel.

2. Pembaca Beban (*Load Cell*)

Merupakan sistem pembaca beban. *Load cell* mempunyai batas kapasitas, pada alat uji *LFPlus* series di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI kapasitas *load cell* tidak lebih dari 1 kN. Penggunaan *load cell* harus diperhatikan, jika beban melebihi kapasitas *load cell* maka kemungkinan *load cell* akan mengalami kerusakan.

3. pemegang spesimen (*grips*)

Alat pemegang spesimen harus sesuai dengan spesifikasi sampel. Jenis dan bentuk *grips* tergantung dimensi sampel. Jika jenis dan bentuk *grips* yang digunakan tidak sesuai dengan sampel yang diuji, maka kemungkinan besar akan terjadi kesalahan pada pengujian seperti terjadi slip pada pemegang, terbentuknya konsentrasi tegangan pada pemegang spesimen dan kerusakan pada bagian *grips*. Bentuk *grips* yang digunakan pada laboratorium Polimer Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI berbentuk silinder.



Gambar 2.18. Mesin uji LFPlus Series.

Pada Gambar 2.18 memperlihatkan mesin LFPlus Series mempunyai panjang total 913 mm dan total luas alas meja 400 x 500 mm. Sebelum digunakan mesin ini harus diletakkan dalam pada bidang datar, sehingga pada saat pengujian tidak mengalami kesalahan. Mesin ini juga memiliki sistem keamanan yang baik. Tombol darurat yang berada pada sebelah kiri berfungsi untuk menghentikan pengujian jika terjadi sesuatu yang berbahaya. Dengan sistem digital yang mudah dioperasikan mesin uji LFPlus ini dapat digunakan sebagai alat laboratorium di Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang handal.

II.4.1 Pengaturan uji

LFPlus dirancang dengan tiga pengaturan uji yaitu *limit test*, *cycle test*, dan *break test*.

1. Limit test

Pengujian akan berlangsung hingga batas tertentu. Batas pengujian diukur dengan satuan mm atau inci, % elongasi, Newtons, Kg force, lbs force, mega pascal dan Kgf per mm².

2. Cycle test

Pengujian akan berlangsung secara siklus. Pertama *crosshead* akan ke titik batas kemudian bergerak ke titik kedua. Proses ini berlangsung terus-menerus tergantung jumlah siklus yang telah diatur. Mesin LFPlus Series ini dapat diatur hingga 10000 siklus.

3. Break test

Pengujian akan berlangsung hingga spesimen yang putus terdeteksi oleh mesin. Terdapat dua jenis detektor pada alat uji ini yaitu tipe *break detector* dan *sharp detector*. Pertama, *break detektor* akan mendeteksi spesimen yang putus apabila beban turun secara drastis hingga 50% beban maksimum yang telah terbaca. Kedua, *sharp detektor* akan mendeteksi ketika terjadi penurunan beban secara drastis.

II.4.2 Panel kontrol

Alat LFPlus Series ini mudah digunakan dengan atau tanpa komputer, untuk pengaturan mesin ini mempunyai panel kontrol berupa *Liquid Crystal Display* (LCD) untuk mengatur informasi, beban dan nilai perpajangan dll seperti pada Gambar 2.19. Mesin ini juga dapat menyimpan informasi sampel yang telah dibuat. Dengan mengaktifkan menu pertanyaan, maka operator akan lebih mudah mengontrol data pengujian.



Gambar 2.19. Panel kontrol yang terdiri dari empat kelompok tombol kontrol.

Panel kontrol terdiri dari empat tingkatan tombol seperti pada Gambar 2.19. Ke-empat kelompok tombol tersebut mempunyai tujuan dan cara penggunaan yang berbeda-beda.

1. Kelompok pertama

Terdiri dari tombol pengaturan uji seperti pada Gambar 2.20, yaitu:

- Tombol **GO** berfungsi untuk memulai pengujian. Pengujian akan dimulai bila semua pengaturan telah diatur sedemikian rupa.
- Tombol **STOP** berfungsi untuk menghentikan pengujian pada saat pengujian sedang berlangsung, menekan tombol ini pada saat pengujian berlangsung akan menyebabkan berhentinya gerakan *crosshead* pada mesin.
- Tombol **JOG** ke bawah/atas akan memberikan respon kepada *crosshead* untuk bergerak ke posisi tertentu. Kecepatan turun-naik *crosshead* dengan menggunakan tombol ini dapat diatur.



Gambar 2.20. Tombol kelompok pertama berfungsi mengatur gerakan dan posisi *crosshead* sebelum dan sesudah pengujian.

- Tombol **FAST** ke bawah/atas juga memberikan respon kepada *crosshead* untuk bergerak ke posisi tertentu, tetapi dengan kecepatan maksimum.
- Menekan tombol **ZERO**, berarti mengatur nilai beban dan perpanjangan ke nilai nol. Hal ini dilakukan sebelum melakukan pengujian dengan menekan tombol **GO**.
- Tombol **RETURN** berfungsi memposisikan *crosshead* pada posisi saat operator menekan tombol **ZERO** terakhir kali.

2. Kelompok tombol kedua

Terdiri dari empat tombol yang berguna untuk memilih opsi-opsi yang terdapat pada layar, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Ke-empat tombol pada kelompok tombol kedua.

3. Kelompok tombol ketiga

Terdiri dari 12 tombol seperti pada Gambar 2.22, tombol-tombol ini berguna untuk mengisi data yang terdapat pada layar. Data yang diisikan berupa angka 0-9 dan huruf A-Z, untuk tujuan melengkapi pengaturan pengujian.



Gambar 2.22. Kelompok tombol ketiga yang berfungsi mengisi data.

4. Kelompok ke-empat

Tombol ENTER sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.23, bertujuan untuk memasukkan data berupa teks atau angka yang telah ditulis pada layar. Tombol ini juga menyelesaikan pengaturan yang terlihat pada layar, sehingga akan kembali pada layar sebelumnya.



Gambar 2.23. Tombol kelompok ke-empat bertujuan untuk menyelesaikan dan memasukkan suatu data maupun perintah.

II.5 PROGRAM NEXYGEN

Nexygen merupakan program komputer yang dirancang untuk melakukan pengujian dan pengolahan data dengan komputer. *LFPlus* series dapat dikoneksikan dengan komputer dengan kabel serial RS232. Program **Nexygen** ini juga sesuai dengan operasi sistem berbasis WindowsTM. Program ini juga terintegrasi dengan Microsoft WordTM dan Microsoft ExcelTM, sehingga laporan data pengujian dapat dengan mudah disajikan.

Dengan menggunakan kabel serial RS232 to USB, koneksi dapat dengan mudah via USB (*Universal Serial Bus*). Sehingga komputer yang tidak mempunyai port atau koneksi serial dapat dengan mudah dikoneksikan dengan alat mesin *LFPlus* Series ini. Dengan mengkoneksikan mesin uji ke komputer, maka semua pengaturan pengujian dan pengkondisian alat uji dilakukan dengan kontrol komputer. Pengaturan melalui mesin uji tidak diperlukan. Dengan program **Nexygen** yang telah terprogram pada komputer, maka semua pengaturan pengujian dapat dilakukan via komputer. **Nexygen** ini dapat di-instal dengan CD (*Compact Disk*) yang telah tersedia bersama mesin uji *LFPlus* Series. Langkah-langkah mengaktifkan program **Nexygen** pada komputer berbasis sistem operasi Windows™ dapat dilihat pada Lampiran 1, sedangkan koneksi pada komputer dapat dilihat pada Lampiran 2.

II.5.1 Tampilan layar program Nexygen

Pada tampilan program **Nexygen**, akan terdapat hasil pengujian yang telah dilakukan seperti pada Gambar 2.24. Pengujian pertama akan otomatis berada pada baris pertama, pengujian kedua pada baris kedua dan seterusnya. Sedangkan pada kolom terdapat informasi hasil perhitungan pada pengujian.

	Start Load	End Load	Load Difference	Break
1	157.0 N	119.0 N	37.8 N	No
2	165.0 N	130.0 N	34.9 N	No
3	157.0 N	123.0 N	34.0 N	No
4	160.0 N			Yes

Gambar 2.24. Setiap hasil pengujian yang sudah dilakukan dapat disimpan dan dilihat.

Tab **result** merupakan hasil pengujian berupa kolom dan baris, sehingga kita dapat melihat satu-persatu pengujian yang sudah dilakukan. Pada tab

statistics merupakan data rata-rata dari semua pengujian yang telah dilakukan. Terkadang pada suatu proses yang menghasilkan puluhan data, perlu adanya sistem kontrol seperti diagram kontrol dan histogram. Proses pengujian yang dilakukan dapat dikontrol dengan metoda ini.

II.5.2 Icon perintah

Pada bagian atas tampilan program **Nexygen** terdapat beberapa icon perintah yaitu:



Untuk menghilangkan dan menyimpan suatu objek.



Untuk menyalin suatu objek.



Untuk memunculkan objek yang telah dihilangkan () atau disalin



().



Memulai pengujian baru pada akhir baris.



Membuka grafik hasil pengujian.



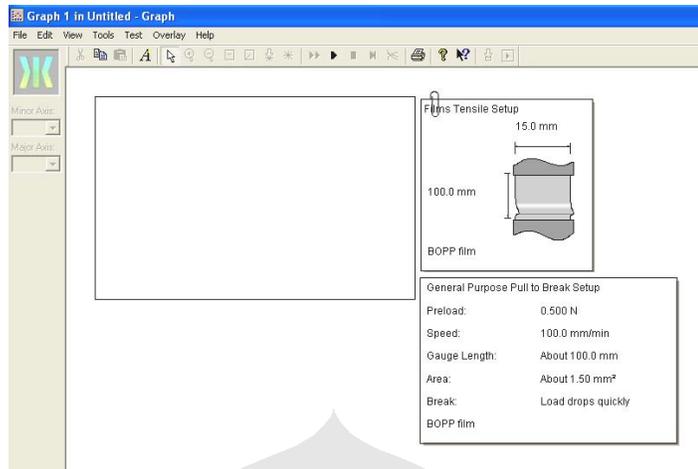
Mencetak laporan seperti pada layar.



Mencetak laporan dengan format Microsoft Word.

II.5.3 Jenis pengujian pada Nexygen

Dengan program **Nexygen** seluruh kendali kontrol dan pengaturan mesin tidak lagi perlu diatur pada mesin, cukup dilakukan melalui komputer. Untuk memulai pengujian, operator dapat memilih jenis pengujian yang ingin dilakukan. Setelah itu, operator dapat melakukan pengaturan pengujian dan informasi sampel yang diperlukan untuk pengolahan data seperti kecepatan tarik, panjang ukur, lebar sampel dan ketebalan sampel seperti pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Pengaturan pengujian dapat dilakukan dengan program **Nexygen** dengan mudah.

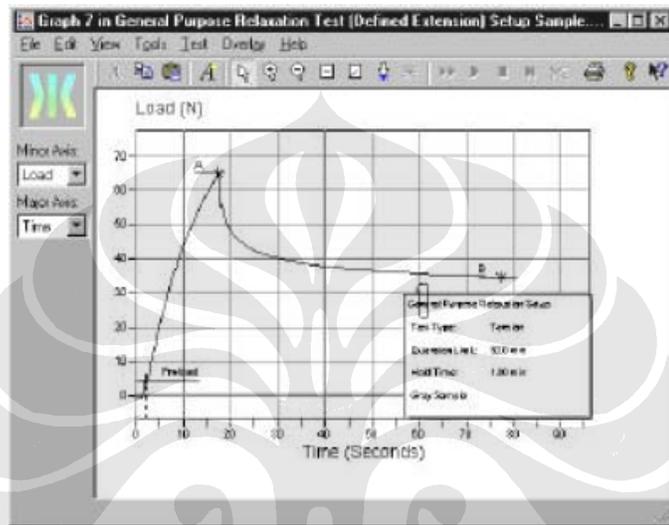
Program **Nexygen** menyediakan beberapa jenis pengujian yang dapat dipilih. Pemilihan jenis pengujian didasarkan dengan tujuan melakukan pengujian. Jenis pengujian yang disediakan oleh **Nexygen** sudah sesuai standard internasional seperti ASTM dan ISO. Pemilihan ini bertujuan memudahkan pengaturan pengujian, sehingga pengujian berjalan dengan efisien. Beberapa jenis pengujian yang disediakan oleh **Nexygen** yaitu :

- Kategori umum
- Kategori film
- Kategori komponen
- Kategori karet
- Kategori busa
- Kategori makanan
- Kategori plastik
- Kategori bata keramik
- Kategori logam
- Kategori tekstil
- Kategori adhesif
- Kategori pegas

II.5.4 Data informasi pada Nexygen

Nexygen dapat memperlihatkan semua informasi yang mendukung untuk analisis data, termasuk grafik hasil pengujian. Laporan dan grafik dapat dengan mudah disajikan dalam format Microsoft WordTM, Microsoft ExcelTM dan Microsoft

Powerpoint™ sehingga memudahkan untuk mempresentasikan hasil pengujian. Pada saat selesai pengujian maka **Nexygen** akan menyediakan grafik dengan sumbu beban, waktu, kekuatan dan persentase regangan. Sumbu horisontal (mayor) dan vertikal (minor) dapat diatur sesuai dengan informasi yang ingin didapatkan, seperti pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26. **Nexygen** mampu memperlihatkan grafik hasil pengujian. Grafik ini merupakan grafik pengujian beban versus waktu.

Selain informasi berupa grafik, **Nexygen** juga menyediakan informasi berupa data. Data-data yang tersedia dapat disimpan setiap pengujian menggunakan program **Nexygen**. Jika pengujian melebihi 50 spesimen, **Nexygen** juga menyediakan perhitungan statistis berupa diagram kontrol. Dengan adanya diagram kontrol, maka operator dapat mengontrol setiap pengujian. Dengan sistem Yes/No atau batas maksimum dan minimum pada suatu nilai data, **Nexygen** dapat menandai pengujian yang tidak masuk spesifikasi atau gagal. Banyaknya pengujian yang diluar spesifikasi dapat dilihat pada diagram batang kontrol. Data yang disajikan oleh program **Nexygen** diantaranya yaitu: kecepatan tarik, beban awal, beban maksimum, perpanjangan pada beban maksimum, kekuatan pada beban maksimum, persentase regangan pada beban maksimum, kekakuan, modulus elastis, beban pada titik luluh, beban pada saat putus, kekuatan

pada saat putus, dll. Data informasi ini dapat ditampilkan atau tidak ditampilkan, pengaturan informasi data dapat dilakukan melalui menu **Nexygen** seperti pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27. Data informasi yang disediakan oleh **Nexygen**. Data informasi tersebut dapat ditampilkan atau tidak ditampilkan.