

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

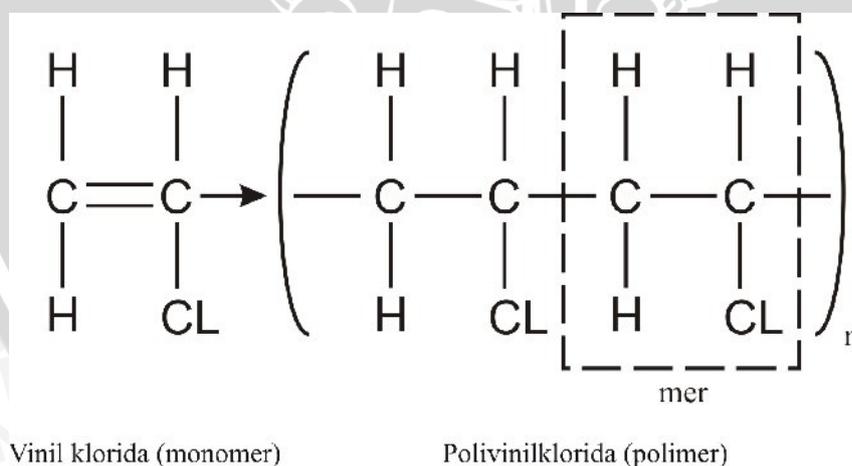
2.1 Penelitian Yang Pernah Dilakukan

Pada penelitian Sugondo (2008 : 6) menyatakan bahwa proses pembentukan pada *vacuum forming* dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti: temperatur pemanasan, lama waktu penahanan (*holding time*) dan tekanan. Dalam penelitian tersebut parameter yang diatur berupa temperatur pemanasan dan waktu pemanasan, sehingga diketahui pengaruh penambahan temperatur dan waktu pemanasan terhadap kualitas plastik *tray*.

Pada penelitian Ali (2009 : 37) menyarankan perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang pengaruh waktu pemanasan yang lebih lama, sehingga hasil pemanasan *sheet* lebih merata.

2.2 Bahan Polimer

Polimer adalah molekul makro yang tersusun dari satuan – satuan kimia sederhana yang disebut monomer. Contohnya *polyvinylchloride*, dimana polimernya tersusun oleh monomer – monomer *vinylchloride* ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) (Surdia, 1984 : 217).



Bahan polimer yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan yang biasa digunakan sehari – hari. Umumnya suatu polimer dibangun oleh satuan struktur tersusun secara berulang diikat oleh gaya tarik – menarik yang kuat disebut ikatan kovalen, dimana setiap atom dari pasangan terikat menyumbangkan

satu elektron untuk membentuk sepasang elektron. Sifat – sifat khas bahan polimer pada umumnya adalah sebagai berikut (Surdia. 1984 : 173) :

- 1) Sifat mampu cetaknya baik. Pada temperatur relatif rendah bahan dapat dicetak dengan penyuntikan, penekanan, ekstrusi, *vacuum* yang menyebabkan ongkos pembuatan lebih rendah dari pada untuk logam dan keramik.
- 2) Dapat dibuat produk yang ringan dan kuat. Berat jenis polimer lebih rendah bila dibandingkan dengan logam dan keramik.
- 3) Banyak diantara polimer bersifat isolasi listrik yang baik.
- 4) Baik sekali dalam ketahanan air dan ketahanan zat kimia. Pemilihan bahan yang baik akan menghasilkan produk yang mempunyai sifat-sifat baik sekali.
- 5) Umumnya bahan polimer lebih murah.
- 6) Kurang tahan terhadap panas. Hal ini sangat berbeda dengan logam dan keramik. Walaupun ketahanan panas bahan polimer tidak sekuat logam dan keramik, pada penggunaannya harus cukup diperhatikan.
- 7) Kekerasan permukaan yang sangat kurang. Bahan polimer yang keras ada, tetapi masih jauh di bawah kekerasan logam dan keramik.
- 8) Kurang tahan terhadap pelarut.
- 9) Mudah termuati listrik secara elektrostatik.

2.2.1. Massa Jenis

Massa jenis polimer jauh lebih rendah dari pada logam ($2,7 - 9 \text{ g/cm}^3$) dan keramik ($2,1 - 5,3 \text{ g/cm}^3$) (Surdia. 1984 : 173). Dilihat dari mahal atau murahnya, massa jenis adalah faktor yang penting. Untuk membandingkan bahan – bahan yang menyangkut berat dan volume, bahan polimer kadang – kadang dipakai memperkecil massa jenis dengan pembusaan, karena itu massa jenisnya menjadi lebih penting dari bahan lain.

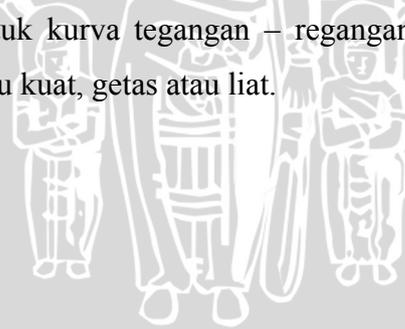
2.2.2. Sifat-sifat Mekanik

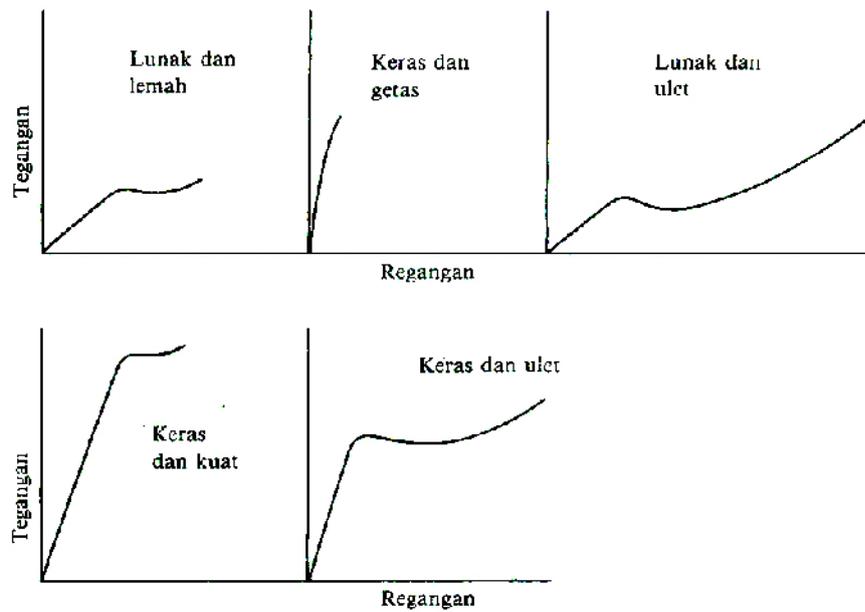
Sifat-sifat mekanik bahan polimer memiliki sifat khas yaitu memiliki sifat viskoelastik yang dominan. Salah satu contoh bahan polimer yang memiliki sifat

viskoelastik adalah *polyvinylchloride*. Perpanjangannya tidak selalu sebanding dengan beban yang diberikan dan pada penurunan kembali beban, sebagian kecil regangannya hilang kembali, tetapi sebagian besar tetap ada yang tidak kembali ke panjang asal karena bahan polimer tidak selengkapnya merupakan bahan yang elastik tetapi mempunyai viskositas. Bahan yang mempunyai kedua sifat elastik dan kental disebut viskoelastik. Perubahan temperatur dapat menyebabkan sifat – sifatnya berubah, oleh karena perubahan temperatur harus cukup diperhatikan sebelum penggunaan bahan polimer.

2.2.2.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik adalah salah satu sifat dasar dari bahan. Hubungan tegangan – regangan pada tarikan memberikan nilai yang cukup berubah tergantung pada laju tegangan, temperatur, lembaban dan seterusnya karena dalam bahan polimer sifat-sifat viskoelastik mempunyai kekhasan seperti dinyatakan di atas. Umumnya kekuatan tarik dari bahan polimer lebih rendah dari pada logam, seperti baja yang mempunyai kekuatan tarik sebesar 70 kgf/mm^2 . Pada resin biasa seperti *polystyrene*, *polyethylene* dan *polypropylene* kekuatan tariknya antara 0,7 - 8,4 kgf/mm^2 (Surdia. 1984 : 180). Gambar 2.1 menunjukkan kelakuan tarikan dari bahan polimer dalam bentuk kurva tegangan – regangan menurut ciri khasnya lunak atau keras, lemah atau kuat, getas atau liat.





Gambar 2.1. Kekuatan tarik bahan polimer
 Sumber : Surdia. 1984 : 180

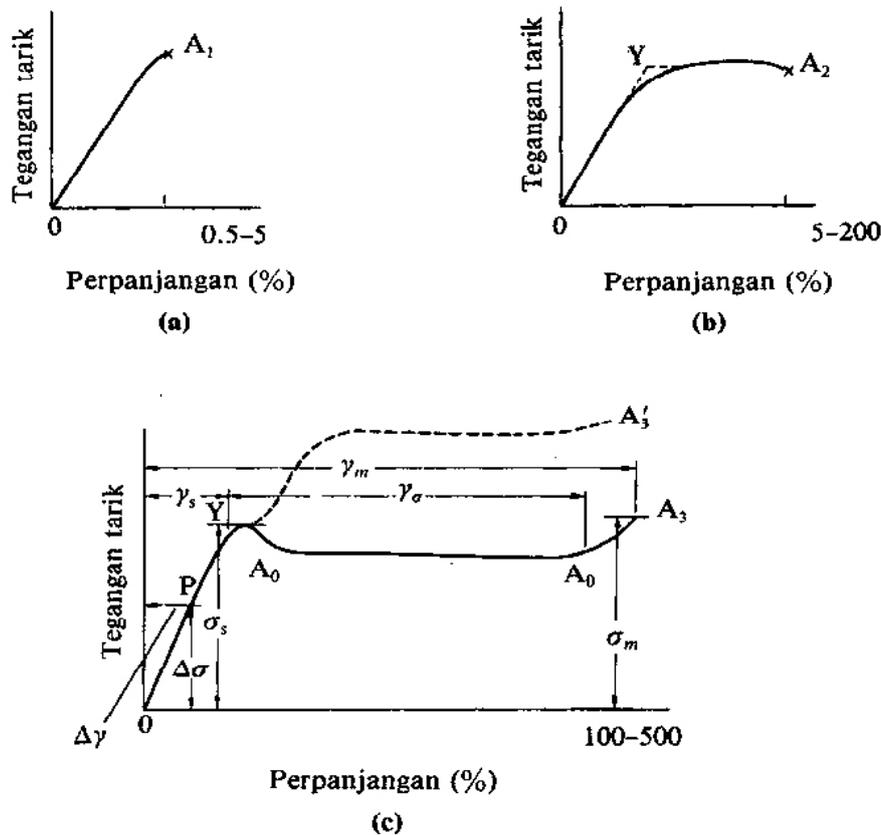
Dilihat dari kemampuan mulurnya, ada tiga jenis kurva tegangan – regangan (Surdia. 1984 : 181) seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.

Garis OA_1 pada (a) laju perpanjangannya agak rendah dan meningkat sampai 0,5-2% pada saat patah menunjukkan hubungan lurus. Bahan yang termasuk kelompok ini adalah fenol, urea, melamin, *polyester* tak jenuh, *epoksi* dan resin *styrene* yang bersifat patah getas.

Pada jenis selanjutnya, yang ditunjukkan pada (c), O lurus sampai titik mulur pada Y, tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang besar sampai 100-1000% dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat. Kadang – kadang peningkatan terakhir ini tidak dapat teramati. Bahan yang termasuk kelompok ini adalah *polyethylene*, *polypropylene*, *polyasetal* dan lainnya yang terdiri dari molekul rantai.

Jenis (b) ada di antara (a) dan (c) yang tidak menunjukkan penurunan beban. Beban meningkat yang akhirnya mengakibatkan patah. Bahan yang termasuk jenis ini adalah resin *ABS*, *asetat*, resin *fluoro*. Kemampuan bahan tersebut berlaku pada temperatur kamar (20° C). Kemampuan tersebut akan berubah banyak apabila temperatur berubah. Resin *thermoset* seperti resin *fenol* menunjukkan kemampuan seperti pada (a), walaupun temperatur berubah sampai

batas tertentu, sedangkan resin *thermoplastics* sering berubah dari kemampuan (a) ke (c) apabila temperatur meningkat.



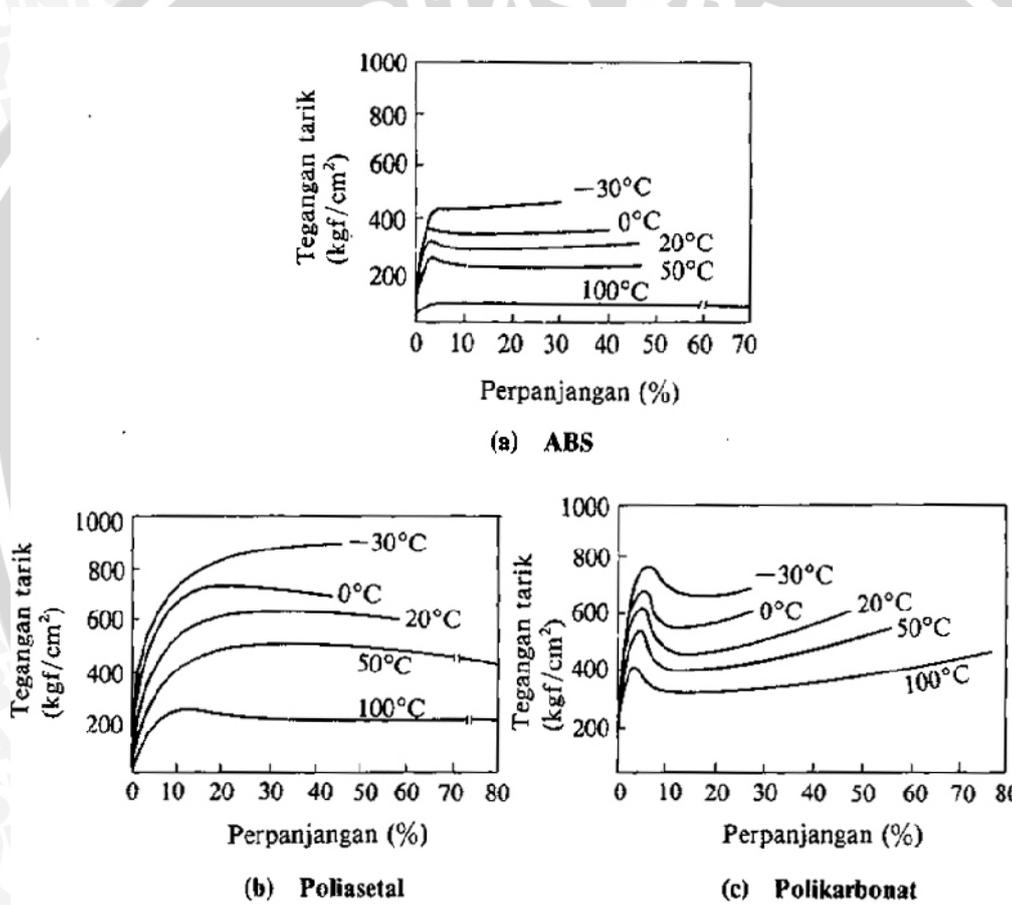
Gambar 2.2. Kemampuan mulur dalam kurva tegangan-regangan

Sumber : Surdia. 1984 : 180

Dari setiap gambar tersebut, konstanta perbandingan antara tegangan dan regangan pada bagian lurus OY adalah modulus elastik yaitu *modulus elastic Young*. *Modulus elastic Young* pada bagian polimer terletak di daerah $0,1 - 21 \times 10^2 \text{ kgf/mm}^2$. Harga tersebut lebih rendah dari pada untuk baja yaitu sebesar $200 \times 10^2 \text{ kgf/mm}^2$. Akan tetapi kalau molekul rantai cukup terarah seperti serat, maka harga tersebut di atas menjadi lebih besar hampir menyamai logam. Deformasi oleh penarikan sampai patah berbeda banyak tergantung pada jenis dan temperatur polimer. Pada temperatur 20° C , perpanjangannya ada pada daerah luas yaitu $0,5-700\%$. Sebagian besar dari plastik *thermoset*, perpanjangannya kurang dari 5% . Pada resin *thermoplastic* berkristal, umumnya menunjukkan tipe (c) dengan perpanjangan yang jelas.

- Pengaruh temperatur

Pengaruh temperatur pada *thermoplastic* sangat besar. Bila temperatur dinaikkan, kekuatannya akan turun. Kurva tegangan – regangan berubah banyak seperti pada gambar 2.3. Pada setiap temperatur tertentu (temperatur lunak dan temperatur transisi gelas) sebagai batas, deformasi karena tarikan meningkat cepat dan tegangan patahnya serta modulus elastiknya menurun. Berlawanan dengan itu di bawah temperatur tersebut, tegangan patah dan modulus elastik meningkat dan regangan patahnya kecil. Jadi pada bahan polimer perlu mengenal jenis temperatur khas tersebut.



Gambar 2.3. Kurva tegangan-regangan beberapa jenis polimer

Sumber : Surdia. 1984 : 182

- Pengaruh laju tegangan

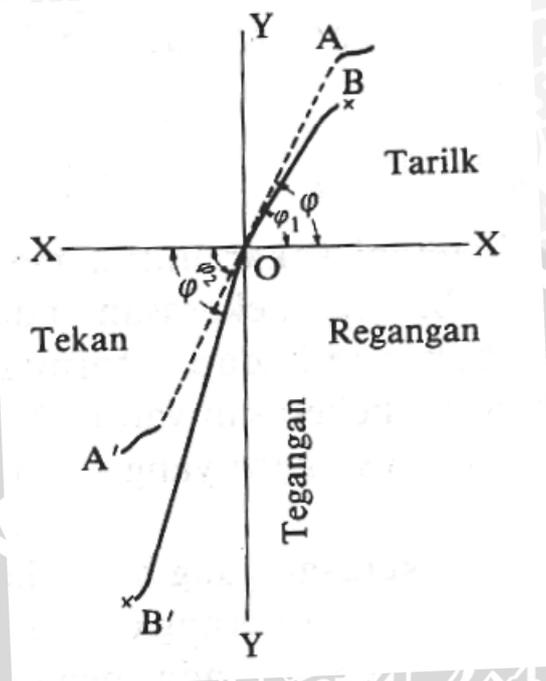
Kemampuan bahan polimer akan berubah karena pembebanan, baik beban ringan dan perlahan, maupun secara tiba-tiba. Pengaruh tersebut sangat terlihat pada bahan yang mempunyai sifat viskoelastik seperti polimer.

Makin tinggi laju tegangan makin besar beban patah dan modulus elastiknya, sedangkan perpanjangannya menjadi kecil. Jadi laju tegangan memberikan pengaruh besar pada sifat – sifat mekanik bahan polimer.

2.2.2.2 Sifat-sifat Pada Penekanan

Beban tekan berbanding terbalik dengan beban tarik. Jika bahan polimer mempunyai cacat yang kecil atau mengandung zat pengisi tertentu, maka bahan polimer dapat mengalami deformasi yang besar. Pada umumnya kekuatan tekan lebih besar dari pada kekuatan tarik dan modulus elastik untuk tekan juga lebih besar dari pada untuk tarik.

Jika bahan polimer mengalami beban tekan tegangan tekan sangat berbeda dengan tegangan tarik. Ditunjukkan pada gambar 2.4, untuk logam A A' adalah garis lurus membentuk sudut yang dengan sumbu X, sedangkan untuk bahan polimer, garis BOB' membentuk sudut $\phi_1 < \phi_2$, ini berarti bahwa modulus elastik untuk tekan lebih besar. Disamping itu kekuatan tekan bahan polimer umumnya 2-5 kali lebih besar dari tekanan gesernya. Oleh karena itu kehancuran karena geseran lebih mudah dari pada disebabkan tekanan. Sebagian besar dari resin *thermoset* dan *thermoplastic* termasuk bahan yang berdeformasi banyak, mulur tetapi tidak mudah patah. Sama seperti sifat – sifat lainnya, titik mulur, tegangan patah, modulus elastik untuk tekan berkurang dan regangan patah cenderung bertambah sesuai dengan naiknya temperatur dan kelembaban. Terutama bahan *thermoplastic* sangat dipengaruhi panas.



Gambar 2.4. Kurva tekan dan tarik bahan polimer
Sumber : Surdia. 1984 : 185

2.2.3 Sifat-sifat Thermal

Sifat khas bahan polimer sangat terpengaruh oleh perubahan temperatur. Hal ini disebabkan karena apabila temperatur berubah, pergerakan molekul karena panas akan mengubah kumpulan molekul atau mengubah struktur (terutama struktur yang berdimensi besar). Selanjutnya, karena panas, oksigen dan air bersama – sama memacu reaksi kimia pada molekul – molekul, terjadilah depolimerisasi, oksidasi, hidrolisa yang lebih hebat terjadi pada temperatur tinggi. Keadaan tersebut jelas akan mempengaruhi sifat mekanik, sifat listrik dan sifat kimianya. Panas jenis bahan polimer berkisar antara $0,25 - 0,55 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, lebih besar dibandingkan dengan bahan logam dan keramik. Hal ini disebabkan karena panas jenis adalah panas yang diperlukan untuk pergerakan termal dari molekul-molekul dalam strukturnya, sedangkan energi kinetik termal dari molekul lebih besar dari energi relaksasinya kisi kristal.

2.3. Polyvinylchloride

1. Cara produksi

Polyvinylchloride dibuat dari etilen yang direaksikan dengan klorida (Cl_2) hingga menghasilkan etilen diklorida ($\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$). Etilen diklorida dipanaskan pada temperatur di atas 190°C sehingga asam klorida (HCl) yang ada di dalam etilen diklorida terurai/terpisah dan menghasilkan vinilklorida ($\text{CHCl}=\text{CH}_2$). Kemudian vinilklorida dilakukan proses polimerisasi sehingga menjadi polivinilklorida.

2. Sifat-sifat

- Polyvinylchloride* merupakan tepung putih yang bermassa jenis $1,4\text{g/cm}^3$.
- Tahan air dan tahan asam.
- Tidak bersifat racun.
- Isolator listrik yang baik.
- Tahan terhadap larutan seperti methanol, etanol, asam asetat eter, dan air.
- Melunak pada temperatur $65-120^\circ\text{C}$, plastis pada $120-150^\circ\text{C}$, dan mencair di atas 170°C .

3. Penggunaan

Film vinil digunakan dalam pertanian, lapisan kabel listrik, produk dari resin pasta digunakan untuk boneka dan mainan, sarung tangan tahan air, pipa kaku, serta dapat juga digunakan untuk botol.

Tabel 2.1. Data properties material *Polyvinylchloride (PVC)*

No.	<i>Polyvinylchloride</i>	Data Spesifik
1.	Massa jenis	$1,4\text{ g/cm}^3$
2.	Kekuatan tarik	$0,7-2,4\text{ kgf/mm}^2$
3.	Temperatur plastis	$120-170^\circ\text{C}$

Sumber : Surdia. 1984 : 184

2.4. *Thermoforming*

Merupakan salah satu proses manufaktur yang mempunyai kelebihan dan keunggulan dalam prosesnya. Proses *thermoforming* dapat dikerjakan secara manual hingga otomatis penuh dengan skala produksi yang besar. *Thermoforming* secara umum merupakan proses memanaskan dan membentuk lembaran plastik pada suatu cetakan. Dalam proses manufakturnya *thermoforming* lebih kompetitif dari pada *injection molding* dan *blow molding*. Hanya membutuhkan tekanan pembentukan yang rendah dan tanpa memerlukan material dan biaya produksi yang mahal untuk dapat membentuk produk yang sama seperti *injection molding* dengan biaya lebih ekonomis. *Thermoforming* pada umumnya meliputi banyak proses diantaranya :

- *vacuum forming*
- *pressure forming*
- *plug assist forming*
- dan berbagai macam kombinasi *vacuum – preassure forming*.

Thermoforming merupakan proses manufaktur yang relatif mudah dengan biaya lebih murah dan waktu lebih singkat bila dibandingkan dengan proses pembentukan material polimer lainnya. Secara umum proses *thermoforming* terdiri atas lima langkah yaitu (Dong and Bhattacharyya, 2005: 74) :

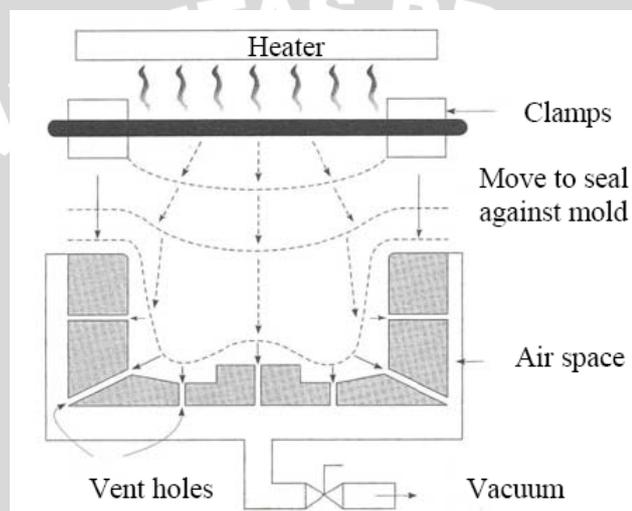
- *Clamping* (penjepitan lembaran plastik)
- *Heating* (pemanasan lembaran plastik hingga mencapai suhu pembentukannya)
- *Shaping* (pembentukan lembaran plastik ke dalam rongga cetakan yang dibuat)
- *Cooling* (pendinginan agar produk menjadi padat dan mempertahankan bentuk akhirnya)
- *Trimming* (pembuangan material yang tidak dibutuhkan)

Produk *thermoforming* sangatlah familiar dengan kehidupan sehari – hari kita karena sering kita jumpai produk hasil proses *thermoforming*, contohnya plastik untuk pengepakan makanan, tempat/kotak untuk penyimpanan buah-buahan dan masih banyak lagi. Dalam dunia otomotif juga sering kita jumpai

produk hasil *thermoforming* diantaranya panel odometer dan speedometer, pelindung tuas persneling, panel-panel pada *exterior* dan *dashboard* mobil, dan lain-lain. Metode *thermoforming* yang paling banyak digunakan dalam manufaktur plastik yaitu *vacuum forming* dan *pressure forming*.

2.4.1 Vacuum Forming

Vacuum Forming merupakan proses pembentukan lembaran Thermoplastik yang memanfaatkan pemanasan dan tekanan *vacuum* sebagai proses pembentukannya.



Gambar 2.6. Proses *Vacuum Forming* dengan *Female Mold*

Sumber : Karjust, K; Kuttner, R and Pohlak, M. 2008 : 1

2.4.1.1 Clamping

Pada saat akan memulai proses *vacuum forming*, langkah awal yang kita lakukan adalah meletakkan lembaran *thermoplastik* pada sebuah penjepit. Lembaran *thermoplastic* tersebut kemudian kita *clamp* atau jepit dengan menggunakan sebuah *frame* yang bertujuan agar posisi lembaran *thermoplastic* tidak berubah dan diam pada saat terjadinya proses pemanasan lembaran hingga menuju suhu plastis dan pada saat lembaran *thermoplastic* diberi perlakuan tekanan untuk proses pembentukannya. Hendaknya *frame* dibuat sedemikian rupa agar mampu menjepit lembaran material *thermoplastic* dengan kuat. *Frame* disini juga berfungsi membatasi daerah *thermoplastik* yang dipanaskan serta sebagai

penahan agar udara dari luar tidak menyusup kedalam cetakan pada saat dilakukan proses evakuasi udara.

2.4.1.2 Heating

Setelah kita meletakkan material thermoplastik dan menjepitnya diatas cetakan barulah dilakukan proses *heating* atau pemanasan. Energi panas bersumber dari system pemanas yang diletakan tepat diatas material yang kemudian membentuk daerah pemanasan. Besarnya nilai temperatur panas tergantung temperatur forming masing-masing material *thermoplastic* yang akan digunakan.

Pada *vacuum forming*, proses pemanasan inilah yang harus benar-benar diperhatikan. Hal tersebut dikarenakan agar energi panas yang diberikan sistem pemanas dapat terserap merata dan dengan sempurna oleh seluruh material lembaran polimer pada daerah pemanasan. Jika pemanasan dapat terserap sempurna, maka perubahan menjadi fase plastis juga akan sempurna. Hal ini tentunya mempengaruhi keberhasilan proses pembentukan selanjutnya. Waktu pemanasan tergantung terhadap jenis material dan ketebalan material.

Pemanas yang digunakan terdapat berbagai macam cara dan fungsi. pada umumnya terbagi atas dua jenis yaitu menggunakan gelombang infra merah dan lilitan pemanas atau *hot wires*. Pemanas juga dibagi dua berdasarkan fungsinya yaitu pemanasan satu arah dan dua arah. Hal ini bergantung kepada ketebalan lembaran *thermoplastic* yang akan digunakan. Jika ketebalan material polimer tidak lebih dari tiga millimeter maka menggunakan pemanas satu arah. Bentuk pemanas ada yang bulat, segi empat dan segitiga tergantung dari bentuk cetakan.

Penempatan pemanas ada dua macam yaitu datar atau rata pada bidang cetakan dan melengkung. Penempatan yang datar dapat lebih mudah meratakan suhu yang diberikan pada *sheet*, sedangkan yang melengkung akan lebih mudah memberikan panas pada *sheet* yang dipanasi secara radiasi. Jika pemanasan dapat terserap sempurna, maka perubahan menjadi fase plastis juga akan sempurna. Hal ini tentunya mempengaruhi keberhasilan proses pembentukan selanjutnya. Waktu pemanasan tergantung terhadap jenis material dan ketebalan material.

2.4.1.3 Shaping

Setelah lembaran thermoplastik yang dipanaskan telah mencapai fase plastisnya, bentuknya akan terlihat lembek dan bahkan bisa sampai melendut cekung. Pada saat itulah mulai dilakukan *shaping* atau pembentukan lembaran thermoplastik tersebut. Mekanisme pembentukannya dalam proses *vacuum forming* ini dengan cara meletakkan penjepit pada cetakan sehingga penjepit dapat menutup rapat cetakan sehingga udara luar tidak ada yang menyusup ke dalam. Kemudian mengevakuasi udara yang berada diantara lembaran *thermoplastic* dengan rongga cetakan menggunakan alat penghisap atau *vacuum pump*. Akibatnya akan dibangkitkan tekan negatif atau hisap yang membuat lembaran *thermoplastic* tersebut tertarik masuk ke dalam rongga cetakan.

Tekanan *vacuum* (P_v) merupakan tekanan absolut (P_{abs}) yang nilainya dibawah tekanan atmosfer (P_{atm}) yang besarnya antara 0 cmHg s/d 76 cmHg. Alat pengukur tekanan *vacuum* adalah *vacuum gauge*. Besarnya tekanan *vacuum* dapat dihitung dengan rumus berikut;

$$P_v = P_{atm} - P_{abs} \quad (2-3)$$

Gaya *bending* (F_b) yang bekerja akibat dari tekanan *vacuum* adalah sebagai berikut:

$$F_b = P_v \cdot A \quad (2-4)$$

gaya *bending* yang bekerja harus lebih kecil dari gaya kritis yang besarnya ditentukan sebagai berikut: (Lange,1985:20.7)

$$F_{cr} = \pi \cdot d_m \cdot t \cdot S_u \cdot \alpha_{cr} \quad (2-5)$$

dengan :

d_m = diameter material yang dibentuk (mm)

t = Tebal material (mm)

S_u = Tegangan tarik *ultimate* material

α_{cr} = *Cracking factor* material.

Tegangan luluh yang terjadi dapat dihitung melalui persamaan berikut ;

$$F_b = \frac{\pi \cdot \sigma_f \cdot d_m \cdot w^2}{2r_d} \quad (2-6)$$

maka;

$$\sigma_f = \frac{F_b \cdot 2r_d}{\pi \cdot d_m \cdot w^2} \quad (2-7)$$

dengan :

σ_f = Tegangan luluh (N.mm⁻²)

F_b = Tegangan bending (N)

r_d = radius *die* (mm)

d_m = diameter material (mm)

w = tebal *sheet* material (mm)

Tegangan radial yang membentuk benda kerja sebagai berikut (Lange,1985:20.7)

$$\sigma_d = e^{\mu\pi/2} \cdot 1,1 \cdot \sigma_f \cdot \ln\left(\frac{R}{r_d}\right) + \left(\frac{2\mu \cdot (R - r_d) \cdot F_{BH}}{w}\right) + \frac{\sigma_f \cdot w}{2r_d} \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (2-8)$$

dengan:

R = jari – jari pada bibir cetakan terluar

$e^{\mu\pi/2}$ = pertambahan beban pada bibir cetakan

1,1 = perubahan beban ideal

F_{bh} = gaya tekan *clamping*

2.4.1.4 Cooling

Setelah lembaran *thermoplastic* terbentuk sesuai dengan rongga cetakan, selanjutnya akan terjadi proses pendinginan. Pendinginan ini memanfaatkan udara dan cetakan yang mempunyai temperatur lebih rendah dari temperatur *thermoplastic*. Perbedaan temperatur itulah yang menyebabkan menurunnya temperatur *thermoplastic* secara signifikan tersebut sehingga kemudian merubah fasenya menjadi *rigid* kembali. Proses pendinginan ini dapat mempengaruhi produk dari *vacuum forming* misalnya kesesuaian bentuk maupun ketebalannya. Pada umumnya ketebalan produk yang paling besar terletak di bagian atas. Hal ini terjadi karena adanya proses pendinginan yang tidak bersamaan. Pendinginan

pada bagian atas akan lebih cepat bila dibandingkan pada bagian bawah karena ketika lembaran polimer yang telah dipanaskan dan diberi tekanan tersebut melakukan kontak dengan cetakan, maka saat itulah mulai terjadi penurunan temperatur yang kemudian akan menyebabkan lembaran polimer tersebut kembali padat atau *rigid*.

2.4.1.5 *Trimming*

Proses manufaktur terakhir dari *vacuum forming* adalah *trimming*, yaitu pembuangan bagian yang tidak dibutuhkan. *Trimming* juga merupakan proses *finishing* produk agar produk dapat langsung dimanfaatkan atau digunakan dengan baik dan sesuai kegunaannya.

2.5 Cetakan

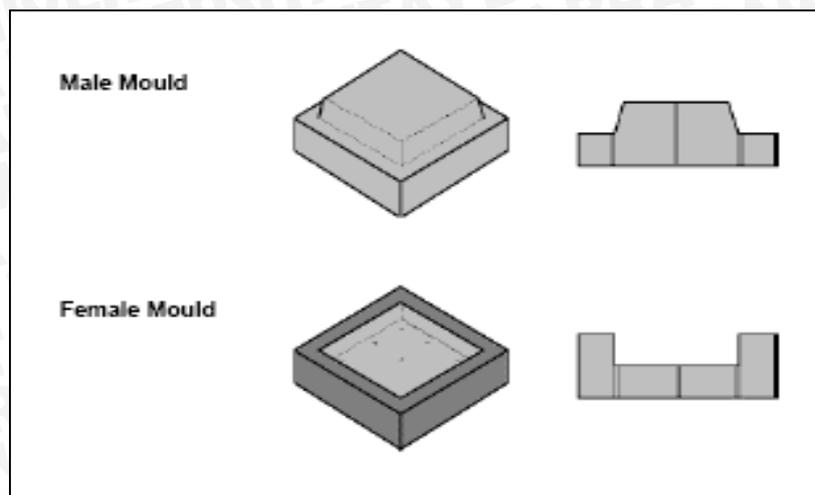
Cetakan yang digunakan pada proses *vacuum forming* dapat dipisahkan berdasarkan tingkat kesulitan desain, lama waktu penggunaan cetakan, dan parameter-parameter lain yang mempunyai tujuan utama dari proses produksi yaitu efisiensi terhadap waktu proses produksi dan biaya.

2.5.1 Bahan Cetakan

Pemilihan material cetakan pada proses *vacuum forming* harus benar-benar sesuai. Jika kita hanya membuat produk yang bentuknya sederhana, kecil dan hanya membutuhkan temperatur yang rendah, kita cukup menggunakan cetakan dari bahan kayu atau gips untuk menghemat biaya, namun apabila kuantitas produk yang dibuat sangat besar dan membutuhkan kontrol yang tinggi sebaiknya kita menggunakan cetakan dari aluminium. Material yang dapat digunakan sebagai bahan cetakan antara lain yaitu kayu, lempung, gips, *cast epoxy resins* dan aluminium.

2.5.2 Desain dan Tipe Cetakan

Tipe cetakan dibagi menjadi dua macam yaitu; *male mould* (positif) dan *female mould* (negatif) dapat dilihat pada gambar 2.10. dibawah ini.



Gambar 2.10. *Male Mold* dan *Female Mold*
 Sumber : Formech International Ltd. 2008: 31

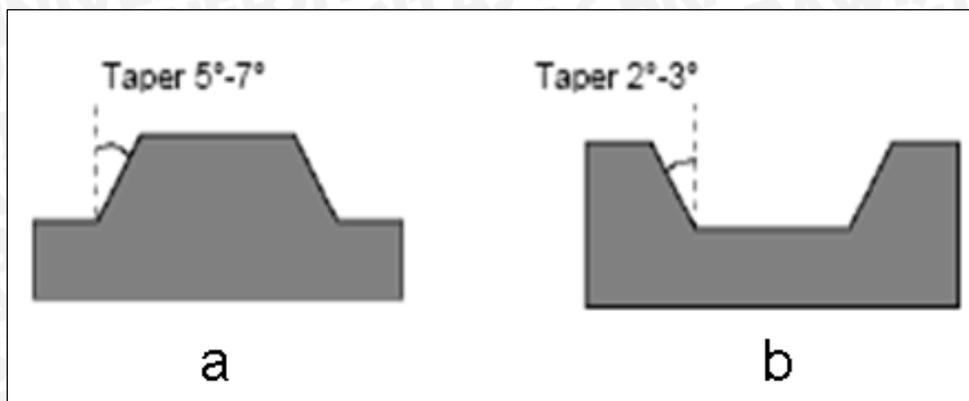
a) *Male mold* atau *positive mold*

Male mold mempunyai sebuah tonjolan keluar atau lebih, dimana bagian tersebut digunakan *sheet* untuk proses pembentukan. Pada umumnya, distribusi ketebalan *male mold* pada permukaan atas produk lebih besar dibandingkan dengan bagian bawah dan dinding – dindingnya. Perbandingan antara kedalaman dan diameter (*draw ratio*) pada *male mold* bisa mencapai 3:1.

b) *Female mold* atau *negative mold*

Female mold mempunyai sebuah rongga atau lebih, dimana pada bagian tersebut diletakkan *sheet* untuk dipanaskan. Ketebalan produk biasanya lebih besar di daerah pinggir atau dinding cetakan. Perbandingan antara kedalaman dan diameter (*draw ratio*) cetakannya lebih kecil dibandingkan dengan *female mold* yaitu 2:1. Bila menggunakan *plug*, *draw ratio* bisa mencapai 5:1

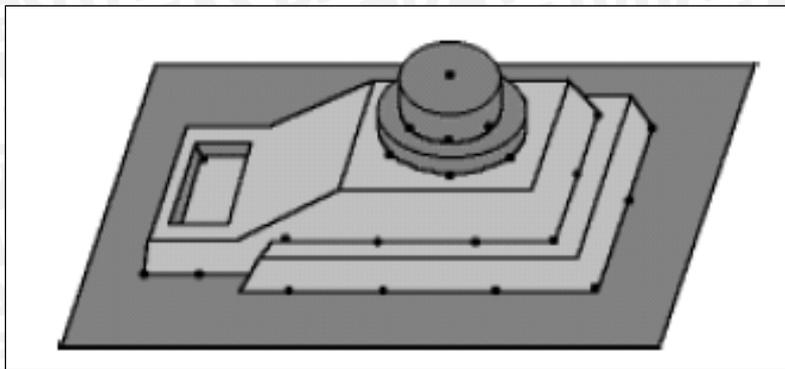
Untuk mempermudah proses pelepasan produk dari cetakan, sebaiknya dinding cetakan diberi sudut kemiringan seperti pada gambar 2.11. besarnya sudut kemiringan tergantung pada kualitas permukaan cetakan, kedalaman daerah dekat sisi tegak dan tipe material yang digunakan. Selain mempermudah proses pelepasan, sudut kemiringan ini berguna untuk meningkatkan kualitas produk akibat penyusutan material produk. Pelepasan yang baik dan sempurna dapat mengurangi resiko cacat produk. Sudut kemiringan minimum yang disarankan untuk *male mould* sebesar 3° sedangkan *female mould* sebesar 5° .



Gambar 2.11. a) *Male Mould* dan b) *Female Mould*
Sumber : Formech International Ltd. 2008: 33

2.5.3 Lubang Pin (*Pin holes*)

Cetakan pada proses *vacuum forming* harus dilengkapi dengan lubang pin (*pin holes*). Lubang pin digunakan sebagai saluran pembuangan pada proses evakuasi udara. Pembuatan, desain dan peletakan lubang pin diharapkan mampu mengevakuasi udara dalam rongga cetakan dengan baik dan sempurna. Idealnya lokasi lubang pin sebaiknya pada bagian tepi pada sisi cetakan atau pada bagian pojok sisi-sisi cetakan. Hal ini dimaksudkan agar pada saat terjadi pengevakuasian udara, lembaran plastik lebih dulu menempel pada bagian tepi kemudian baru ke daerah tengah cetakan sehingga terjadi keseimbangan penekanan agar bentuk yang dihasilkan sesuai dengan bentuk cetakannya, terutama bentuk *cup*.



Gambar 2.12. Contoh pemberian lubang pin pada cetakan *vacuum forming*.

Sumber : Formech International Ltd. 2008 : 34

2.6 Kualitas Produk

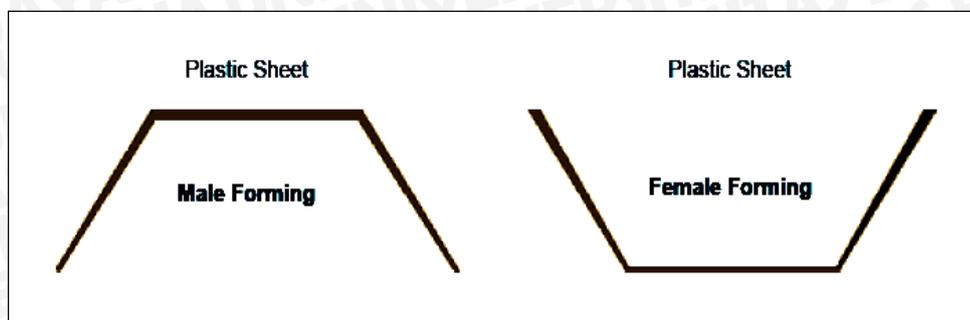
Kualitas produk dari *vacuum forming*, menurut Choo (2008 : 1) pada penelitiannya, menyebutkan bahwa distribusi ketebalan yang dibentuk sering digunakan sebagai suatu pengukur untuk menentukan kualitas hasil-hasil *thermoforming*. Suatu distribusi ketebalan lebih yang seragam, menunjukkan hasil kualitas yang lebih baik. Kualitas produk ditentukan oleh pemilihan bahan serta proses produksi yang dilakukan. Proses produksi dipengaruhi dari berbagai faktor seperti suhu, kecepatan, geometri, bahan, dan suhu lembaran.

2.6.1 Distribusi Ketebalan

Pada saat lembaran plastik yang telah dipanaskan dan diberi tekanan tersebut melakukan kontak dengan cetakan, maka saat itulah mulai terjadi penurunan temperatur yang kemudian akan menyebabkan material plastik tersebut kembali padat. Penurunan temperatur tersebut karena perbedaan temperatur antara lembaran plastik dengan cetakan sehingga terjadi perambatan panas. Inilah yang menjadi dasar mengapa pada *Female Mould* ketebalan produk pada bagian atas lebih tebal dari pada bagian dasarnya, karena pada bagian atas terjadi kontak lebih cepat sehingga terjadi pendinginan terlebih dahulu dan berhenti merenggang (Roberts, 2007: 2).

Distribusi ketebalan produk merupakan faktor penting yang mempengaruhi kualitasnya. Oleh karena alasan tersebut, maka dikembangkan beberapa model proses *vacuum forming* yang fokusnya memprediksi distribusi ketebalan akhir produk yang dihasilkan. Distribusi ketebalan hasil dari proses

vacuum forming dengan menggunakan *male* dan *female mold* dapat kita lihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13. Distribusi ketebalan antara *male mold* dan *female mold*
 Sumber : Formech International Ltd. 2008 : 31

2.7 Teori Pendukung

Berdasarkan teori pembengkokan bahwa regangan suatu bahan akan bertambah besar seiring dengan turunnya radius pada pojok atas cetakan. Jadi untuk menghitung ketebalan akhir produk, maka:

$$H_1 = \frac{(2R + H_0)}{2(R + H_0)} \quad (\text{George E. Dieter, 1988 : 268})$$

- Dimana: e = regangan
- R = radius pojok atas cetakan (mm)
- H₀ = tebal lembaran awal (mm)
- H₁ = tebal lembaran akhir (mm)

2.8 Kerangka Berpikir Teoritis

Penurunan temperatur material *thermoplastic* dikarenakan perambatan panas dari material ke cetakan akibat dari perbedaan temperatur keduanya. Perambatan panas terjadi secara konduksi pada saat material *thermoplastic* mulai dibentuk dan kontak dengan permukaan cetakan. Penurunan temperatur pada material *thermoplastic* menyebabkan fase material berubah secara drastis yang kemudian menurunkan kemampuan bentuknya. Sebagai catatan penting sesuai penjelasan literatur diatas bahwa cetakan pada dasarnya berfungsi sebagai

pendingin agar material *thermoplastic* berubah menjadi *rigid* dan pembentukan terjadi hanya pada saat material *thermoplastic* dalam kondisi plastis.

Dengan lamanya waktu pemanasan pada lembaran material *thermoplastic* diharapkan kita dapat menemukan waktu pemanasan yang ideal untuk mendapatkan distribusi ketebalan yang ideal. Perubahan fase dapat diperlambat dan lebih lama menjaga agar kondisi material *thermoplastic* tetap dalam fase plastis. Jika selama pembentukan fase material *thermoplastic* tetap terjaga dalam kondisi plastis selama proses pembentukan, maka pencapaian terhadap seluruh rongga cetakan dapat tercapai sempurna. Distribusi ketebalan pada seluruh sisi bagian produk terjaga dengan baik.

2.9 Hipotesa

Dari latar belakang dan dasar teori sebelumnya, maka dapat diuraikan suatu hipotesa, yaitu: semakin lama waktu pemanasan maka akan semakin rata panas yang diperoleh lembaran *thermoplastic*, sehingga akan diperoleh distribusi ketebalan yang seragam sesuai dengan teori distribusi ketebalan.

