

PERANCANGAN MESIN *VACUUM FORMING* UNTUK MATERIAL PLASTIK *POLYSTYRENE* (PS) DENGAN UKURAN MAKSIMAL CETAKAN 400x300x150 (mm³)

Diki Irwansyah^{1,a}, Cahyo Budiyanoro^{1,b}, Sunardi^{1,c}

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jalan Brawijaya Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183

^adiki.irwansyah95@gmail.com, ^bcahyo_budi@umy.ac.id, ^csunardi.umy@gmail.com

Abstrak

Tujuan dari Perancangan ini adalah untuk menghasilkan desain mesin *Vacuum Forming* dengan ukuran maksimal cetakan (*Mold*) 400 x 300 x 150 (mm³), menggunakan 2 unit *heater* tipe *strip* dengan daya 250 watt/unit, dan menggunakan *vacuum cleaner* untuk proses vakum dengan *vacuum (max)* : 20 kPa (20.000 Pa) dan *Airflow (max)* : 26,6 l/s (0,0266 m³/dt) yang akan digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan mesin *Vacuum Forming*. Salah satu dari metode *thermo forming* yang sederhana adalah *vacuum forming*. Pada dasarnya metode ini dilakukan dengan memberikan perlakuan panas pada lembaran plastik hingga lembaran plastik menjadi lunak kemudian dibentuk pada cetakan dengan memberikan tekanan vakum. Ada beberapa parameter yang menentukan kualitas hasil cetakan plastik pada proses *vacuum forming* antara lain, jenis plastik, ketebalan plastik, temperatur pemanasan dan tekanan vakum yang digunakan. Pada perancangan mesin *thermoforming vacuum* ini sebagai bahan uji digunakan lembaran plastik *polystyrene* (PS) dengan panjang 420 (mm), lebar 320 (mm) dengan ketebalan 0,5 sampai 2 (mm). Hasil dari Perancangan ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan mesin *Vacuum Forming*.

Kata kunci : Thermoforming Vacuum, Polystyrene, Vacuum Pressure

1. Pendahuluan

Dewasa ini penggunaan plastik tidak bisa terlepas dari kehidupan kita sehari-hari, mulai dari peralatan makan, botol minuman, mainan, *furniture*, perangkat elektronik hingga pembungkus suatu produk. Selain sifat plastik yang mudah dibentuk, ringan, kuat, tahan karat dan sebagai isolator listrik yang baik, beberapa plastik mempunyai sifat fisik yang transparan. (Mujiarto, 2005). Hal ini sangat berguna bagi produk hasil industri-industri kecil dan industri rumah tangga yang biasa disebut dengan UKM yang umumnya produk-produk tersebut dikemas dengan menggunakan kertas, daun kering atau wadah plastik yang tersedia dipasar dengan ukuran dan bentuk standar.

Dengan kondisi kemasan produk yang demikian, dengan kertas yang tidak tahan terhadap zat cair atau plastik yang terlihat sangat sederhana dan terkesan dengan harga yang murah, sehingga sulit untuk meningkatkan harga jual produk.

Salah satu usaha yang dapat diterapkan untuk meningkatkan nilai jual produk adalah dengan membuat kemasan yang menarik dan spesifik serta praktis. Terutama untuk industri-industri kecil dan industri rumah tangga yang memerlukan kemasan yang lebih spesifik untuk mengemas produk yang dihasilkan. Untuk itu diperlukan alat pembentuk atau pembuat kemasan yang mampu mencetak kemasan dengan baik, agar produk yang

dikemas dapat dilihat lebih menarik serta akan menaikkan harga jual produk tersebut.

Untuk membuat alat pembentuk/pencetak kemasan tersebut, maka dilakukan dengan cara mengembangkan diri dibidang *manufacture* dan otomasi dengan memperhatikan hal-hal yang berkaitan diatas maka dirancang Mesin *Vacuum Forming* yang dapat digunakan untuk membuat kemasan yang sesuai dengan kebutuhan, bentuk, dan desain kemasan yang diinginkan.

2. Dasar Teori

Plastik

Plastik adalah suatu bahan *polimer* (biasanya bahan organik) yang memiliki berat molekul besar, bentuk padat, menjadi lunak jika dipanaskan secara perlahan-lahan dan kemudian dapat dibentuk dan dicetak menjadi bentuk yang di inginkan (Nusyirwan, 2007). Meskipun istilah plastik dan *polimer* seringkali dipakai secara sinonim, namun tidak berarti semua *polimer* adalah plastik. Pada dasarnya *polimer* secara umum digolongkan ke dalam 3 (tiga) macam, yakni : (Stevens, 2001).

1. Bahan Termoplastik (*Thermoplastic*), yaitu akan melunak bila dipanaskan dan setelah didinginkan akan dapat mengeras. Termoplastik disebut juga *plastic* komoditi dan sering dipakai dalam bentuk barang yang bersifat pakai-buang (*disposable*) seperti lapisan pengemas (Stevens, 2001,

hal 33). Contoh bahan *thermoplastic* adalah : polistiren, polietilen, polipropilen, nilon, plastik Akrilat (*flexiglass*) dan teflon.

2. Bahan Termoseting (*Thermosetting*), yaitu plastik dalam bentuk cair dan dapat dicetak sesuai yang diinginkan serta akan mengeras jika dipanaskan dan tetap tidak dapat dibuat menjadi plastik lagi. *Thermosetting* disebut juga *plastic* teknik, memiliki sifat mekanik yang unggul, dan daya tahan yang lebih baik (Stevens, 2001, hal 33). Contoh bahan *thermosetting* adalah : bakelit, silikon dan epoksi.
3. Karet (*Elastomer*) yaitu *polimer* yang memperlihatkan resiliensi (daya pegas) atau kemampuan meregang dan kembali ke keadaan semula dengan cepat (Stevens, 2001, hal 36). Contoh *elastomer*, yaitu : karet sintetis.

Polystyrene (PS)

Polystyrene dibuat dengan proses polidisi dan mengandung ring bensin (*aromatic*) yang mengurangi kemampuan rantai untuk dilipat dalam kristalisasi sehingga PS 100% amorphous. Sifat fisik PS bergantung pada berat molekul dan adanya bahan aditif. Sementara PS dengan berat molekul lebih tinggi memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik tetapi memiliki kemampuan proses yang buruk. PS dengan berat molekul rendah memiliki kemampuan proses yang baik namun kekuatan dan ketangguhannya lebih rendah. (Carraher, 2006). Umumnya, keseimbangan dicari di mana panjang rantai menengah digunakan. Panjang rantai yang digunakan secara tipikal berada pada orde 1500-3500 dengan MWD standar sekitar 2,2-3,5. Sejumlah kecil plasticizer sering digunakan untuk meningkatkan kemampuan proses. (Carraher, 2006).

PS digunakan dalam berbagai hal antara lain untuk kemasan dan kotak makanan, mainan, wadah makanan sekali pakai, peralatan elektronik, peralatan rumah tangga, dan peralatan lainnya. PS dapat juga digunakan untuk mengemas peralatan elektronik, seperti TV, komputer, dan peralatan stereo. (Carraher, 2006).

Proses Pembentukan Lembaran Plastik

Secara umum teknologi pemrosesan *plastic* banyak melibatkan operasi yang sama seperti proses produksi logam. Plastik dapat dicetak, dituang, dan dibentuk serta diproses permesinan (*machining*) dan disambung (*joining*). (Mervat, 2010).

Bahan baku plastik banyak dijumpai dalam bentuk pellet atau serbuk. Plastik juga tersedia dalam bentuk lembaran, plat, batangan dan pipa. (Firdaus dan Soejono, 2002).

Plastic Molding merupakan metode proses produksi massal yang cenderung menjadi pilihan untuk digunakan dalam menghasilkan

atau memproses komponen-komponen yang kecil dan berbentuk rumit. Ada dua proses pencetakan dasar, yaitu cetak injeksi dan cetak kompresi. Dalam cetak injeksi, polimer leburan dikompresi ke dalam suatu ruang cetakan tertutup. Cetak kompresi menggunakan panas dan tekanan untuk menekan *polimer* cair, yang dimasukkan antara permukaan cetakan, sehingga membentuk pola yang sesuai. Cetak injeksi umumnya lebih cepat dari pada cetak kompresi. (Stevens, 2001).

Thermoforming

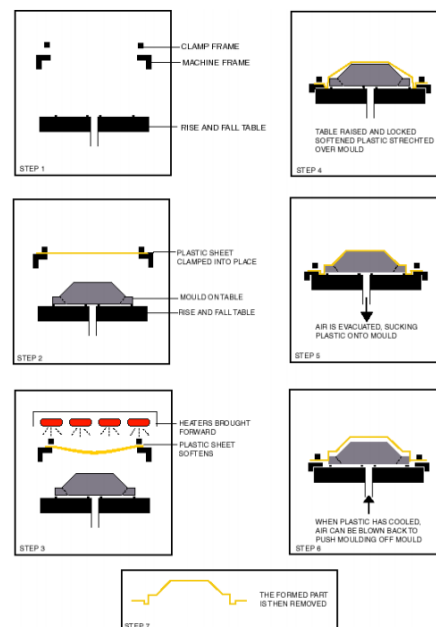
Thermoforming adalah proses pembentukan lembaran plastik dengan cara dilakukan pemanasan terlebih dahulu terhadap lembaran plastik yang kemudian dilakukan pembentukan lembaran plastik dengan cara *vacuum* (penghisapan) atau *pressure* (penekanan) ke cetakan sesuai dengan produk yang ingin diproduksi.

1. Thermoforming Pressure

Thermoforming pressure adalah proses manufaktur dimana lembaran plastik yang sudah dipanaskan kemudian ditekan kedalam rongga cetakan dan ditahan beberapa saat sampai lembaran plastik membentuk sempurna rongga cetakan.

2. Thermoforming Vacuum

Thermoforming vacuum adalah proses manufaktur dimana lembaran plastik yang sudah dipanaskan kemudian diisap ke dalam rongga cetakan. Pengisapan dilakukan dengan cara membuat kondisi vakum (hampa udara) di dalam rongga cetakan. Pengisapan udara dilakukan melalui lubang-lubang kecil yang terdapat dalam rongga cetakan dengan bantuan mesin sehingga proses tersebut bisa dilakukan dengan cepat. Perhatikan proses *vacuum forming* pada (Gambar 1) dibawah ini :



Gambar 1. Proses *Vacuum Forming*
 (Formech International Ltd)

Proses pembentukannya dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti: temperatur pemanasan, jenis dan ketebalan lembaran plastik, dan tekanan vakum yang digunakan. Pada proses *thermoforming vacuum* ini memiliki beberapa keuntungan :

- Tidak perlu tekanan tinggi.
- Kekuatan cetakan tidak terlalu tinggi.
- Mudah mencetak berbagai bentuk, dari bentuk sederhana sampai yang berbentuk rumit.
- Mudah di Automasi.
- Produksi dapat dilakukan dengan amat cepat.
- Produk yang dihasilkan relatif amat seragam.

Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah perpindahan energi karena perbedaan suhu diantara benda atau material. Didalam termodinamika telah diketahui bahwa energi yang dipindahkan itu dinamakan kalor (*heat*). Perpindahan kalor tidak hanya menjelaskan bagaimana energi kalor berpindah dari satu benda ke benda yang lain, tetapi juga untuk mengetahui laju perpindahan yang terjadi pada kondisi tertentu. Laju perpindahan kalor dibagi menjadi tiga macam yaitu konduksi (hantaran), konveksi dan radiasi.

Perangkat Lunak Perancangan

Perancangan ulang merupakan proses yang rumit dan memerlukan waktu yang panjang untuk menyelesaikannya. pada saat teknologi (aplikasi) dalam perancangan belum berkembang proses perancangan seluruhnya dilakukan secara manual dengan menggambar menggunakan pensil dan kemudian digambar ulang menggunakan tinta agar tahan lebih lama. Namun, saat ini sudah banyak berkembang aplikasi-aplikasi yang diperuntukkan dalam bidang perancangan atau disebut dengan CAD (*Computer Aided Design*) dimana sangat membantu dalam proses perancangan atau mendisain sebuah buah produk atau komponen seperti:

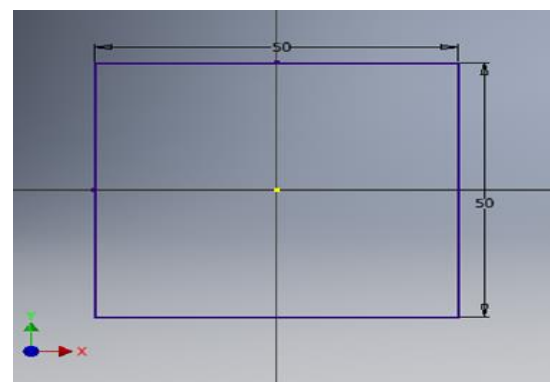
1. Autodesk Inventor
2. Autodesk Fusion 360
3. Solidworks
4. Pro Engineer
5. CATIA
6. Autocad
7. ZWCAD
8. Unigraphics
9. Dan lain-lain..

Software disain yang digunakan untuk mendisain mesin *Vacuum forming* adalah software Autodesk Inventor Professional 2016 yang merupakan software *Computer Aided*

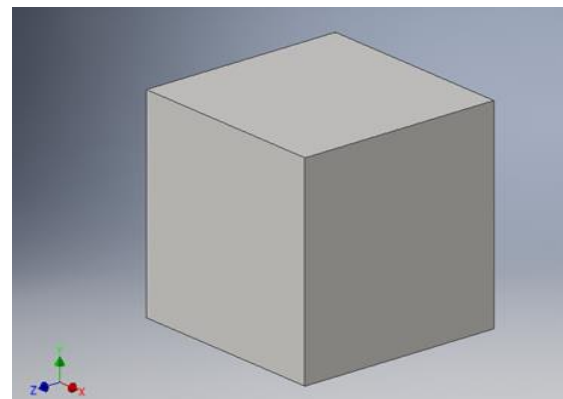
Design 3D yang dikembangkan oleh Autodesk Corporation.

Software Autodesk Inventor Professional 2016

Adalah salah satu software CAD yang mampu membuat gambar 3 Dimensi *solid* dengan cara menggambar 2 Dimensi atau sketsa terlebih dahulu. Pada Autodesk Inventor lebih mudah dalam mengakses *tools* untuk digunakan dalam proses disain, penggambaran 3 Dimensi yang baik dan paling penting memiliki keunggulan dalam proses analisa (*stress analysis*) dalam perhitungan material. Perhatikan penampilan software *autodesk inventor* pada (Gambar 2 dan 3) dibawah ini :



Gambar 2. Disain Software Autodesk Inventor 2D

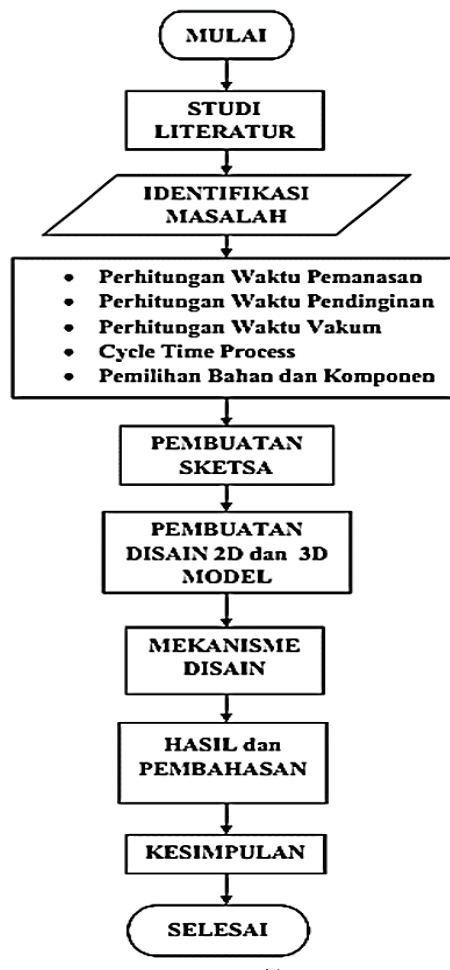


Gambar 3. Disain Software Autodesk Inventor 3D

3. Metodologi

Dalam proses perancangan mesin *vacuum forming* ini didasarkan pada studi literatur yang diperoleh dari buku-buku, jurnal, produk yang sudah ada dipasaran dan juga penelitian terdahulu yang membahas mengenai teori maupun perhitungan dari mesin *vacuum forming* tersebut sehingga permasalahan yang dialami saat perancangan dapat teratasi.

Diagram Alir Perancangan



Bahan Uji

Pada perancangan mesin *vacuum forming* ini bahan plastik uji yang digunakan adalah lembaran plastik jenis *Polystyrene* (PS) dengan ukuran panjang 420mm x lebar 320mm dan tebal 0,5 sampai dengan 2 mm

Komponen Mesin

- Frame (Rangka)**
Digunakan sebagai tumpuan atau pondasi utama dari mesin *vacuum forming*.
- Vacuum Chamber**
Digunakan untuk meletakkan cetakan (*mold*) dan untuk mempermudah ketika proses vakum berlangsung.
- Kotak Pemanas**
Kotak pemanas digunakan sebagai tempat untuk meletakkan/memasang *heater*.
- Heater**
Heater yang digunakan berjumlah 2 unit dan memiliki daya 250 watt/unit.
- Thermocouple**
Digunakan sebagai input sensor untuk *heater* yang dihubungkan dengan *thermocontrol*.

- Thermocontrol**
Digunakan sebagai pembaca/pengatur dari *thermocouple* untuk membaca temperatur dari *heater*.
- Miniature Circuit Breaker (MBC)**
Digunakan sebagai pengaman untuk aliran listrik yang digunakan mesin *vacuum forming*.
- Stopwatch Digital**
Digunakan untuk mengetahui lamanya proses pemanasan ketika pembentukan lembaran plastik.
- Penjepit Plastik (*clamp*)**
Digunakan untuk menjepit lembaran plastik ketika proses pembentukan lembaran plastik.
- Toggle Clamp**
Digunakan untuk pengunci penjepit (*clamp*).
- Bearing**
Berjumlah 6 unit, dimana 4 unit digunakan untuk menggerakkan kotak pemanas dan 2 unit digunakan untuk menggerakkan tuas.
- Plat Aluminium**
Digunakan untuk meratakan panas dari *heater* sebelum ditransferkan ke lembaran plastik.
- Tuas**
Digunakan untuk menaik-turunkan *vacuum chamber*.
- Vacuum Cleaner**
Digunakan untuk proses vakum ketika pembentukan lembaran plastik.

Analisa Data

Pada tahap ini analisa dari hasil data yang diolah adalah:

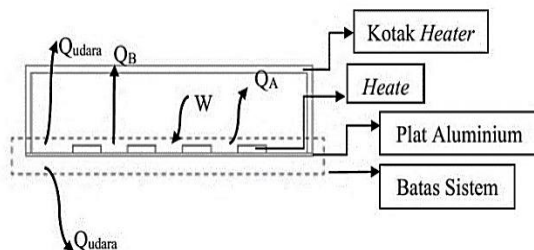
- Menghitung Waktu Pemanasan Lembaran Plastik.
- Menghitung Waktu Pendinginan Lembaran Plastik.
- Menghitung Waktu Vakum Lembaran Plastik.
- Cycle Time Process*.
- Mekanisme Mesin *Vacuum Forming*.
- Spesifikasi Mesin *Vacuum Forming*.

4. Hasil dan Pembahasan

Pada proses pemanasan lembaran plastik, panas dari *heater* tidak langsung ditransferkan ke lembaran plastik. Tetapi, panas dari *heater* di transferkan terlebih dahulu ke plat aluminium dibawahnya yang kemudian diteruskan oleh plat aluminium kelembaran plastik. Hal ini bertujuan agar panas dari *heater* dapat menyebar dengan merata melalui plat aluminium sehingga proses pemanasan berlangsung dengan sempurna. Karena, sifat dari aluminium yang sangat baik dalam menghantarkan panas. Pada Tabel 1 dibawah ini dapat dilihat sifat dari aluminium :

Tabel 1. Typical properties for aluminium.
 (Aalco Metal Ltd)

Property	Value
Atomic Number	13
Atomic Weight (g/mol)	26.98
Valency	3
Crystal Structure	FCC
Melting Point (°C)	660.2
Boiling Point (°C)	2480
Mean Specific Heat (0-100°C) (cal/g. °C)	0.219
Thermal Conductivity (0-100°C) (cal/cms. °C)	0.57
Co-Efficient of Linear Expansion (0-100°C) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	23.5
Electrical Resistivity at 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	2.69
Density (g/cm ³)	2.6898
Modulus of Elasticity (GPa)	68.3
Poissons Ratio	0.34



Gambar 5. Proses Pemanasan Plat Aluminium Oleh Heater

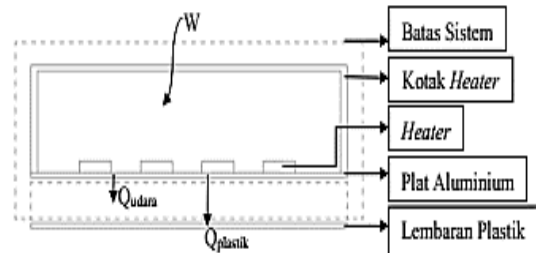
Pemanasan pada plat aluminium oleh heater dapat dilihat pada (Gambar 5) diatas. Di dalam sistem tersebut bagian atau komponen yang akan di tinjau adalah plat aluminium dan heater, sehingga sistem yang digunakan adalah sistem tertutup hukum I termodinamika, yaitu :

$$\begin{aligned}
 Q &= W + \Delta U & (1a) \\
 -Q_{udara} - Q_B - Q_A &= -W + \Delta U & (1b) \\
 -Q_{udara} - Q_B - Q_A &= -P \cdot \Delta t + m \cdot c \cdot \Delta T & (1c)
 \end{aligned}$$

Dimana : Q_{udara} : Jumlah kalor yang dilepaskan ke udara diluar kotak heater dan dibawah plat aluminium.
 Q_B : Jumlah kalor yang dilepaskan ke kotak heater.
 Q_A : Jumlah kalor yang dilepaskan didalam kotak heater.
 P : Daya listrik yang dibutuhkan.
 Δt : Waktu.
 m : Massa benda.
 c : Kalor jenis.
 ΔT : Perbedaan temperatur.

Waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan awal tidak diperhitungkan (diabaikan) karena dalam perancangan mesin *vacuum forming* menggunakan *thermocontrol* untuk mendapatkan temperatur *setting* yaitu 80°C pada plat aluminium. Karena, untuk bahan plastik *polystyrene* (PS) memiliki *glass transition* temperature pada 100°C (373 k).

1. Perhitungan waktu pemanasan lembaran plastik



Gambar 6. Proses Pemanasan Lembaran Plastik

Hukum I termodinamika pada sistem tertutup digunakan untuk menghitung waktu pemanasan lembaran plastik, yaitu :

$$\begin{aligned}
 Q &= W + \Delta U \\
 -Q_{udara} - Q_{plastik} &= -W + 0 \\
 -Q_{udara} - Q_{plastik} &= -P \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

- Menghitung Jumlah Kalor pada Udara (Q_{udara})

Diketahui :

$T_1 = 27^{\circ}\text{C}$ (Asumsi temperatur ruangan)

$T_2 = 80^{\circ}\text{C}$ (Temperatur plat aluminium)

$V_{udara} = (400 \times 300 \times 20) \text{ mm}^3$

$R_{udara} = 0,2870 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$c_{udara} = 0,718 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$\rho_{udara} = 1,1614 \text{ kg/m}^3$

Sehingga, Q_{udara} adalah :

$$\begin{aligned}
 Q_{udara} &= m \cdot c_v \cdot \Delta T \\
 &= \rho_{udara} \cdot V_{udara} \cdot c_{udara} \cdot \Delta T \\
 &= 1,1614 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,4 \times 0,3 \times 0,02) \text{ m}^3 \cdot 0,718 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot (80 - 27)^{\circ}\text{C} \\
 Q_{udara} &= 0,106 \text{ kJ} = 106 \text{ Joule.}
 \end{aligned}$$

- Menghitung Jumlah Kalor pada Plastik ($Q_{plastik}$)

Untuk lembaran plastik jenis *polystyrene* (PS):
 ukuran : $P = 420 \text{ mm}$, $L = 320 \text{ mm}$, $T = 0,5 \text{ mm}$
 Tetapi, untuk proses pembentukan hanya: $P = 400 \text{ mm}$ dan $L = 300 \text{ mm}$.

Diketahui :

$T_1 = 27^{\circ}\text{C}$ (Asumsi temperatur ruangan)

$T_2 = 80^{\circ}\text{C}$ (Temperatur plat aluminium)

$c_{plastik} = 0,5 \text{ kal/gr} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$\rho_{plastik} = 1,05 \text{ gr/cm}^3$

Sehingga, $Q_{plastik}$ adalah :

$$\begin{aligned}
 Q_{plastik} &= m \cdot c \cdot \Delta T \\
 &= \rho_{plastik} \cdot V_{plastik} \cdot c \cdot \Delta T \\
 &= 1,05 \text{ gr/cm}^3 \cdot (40 \times 30 \times 0,05) \text{ cm}^3 \cdot 0,5 \text{ kal/gr} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot (80 - 17)^{\circ}\text{C} \\
 Q_{plastik} &= 1669,5 \text{ kal} = 6989,86 \text{ Joule.}
 \end{aligned}$$

Dalam perancangan mesin *vacuum forming* ini heater yang digunakan adalah tipe *strip heater* yang memiliki daya 250 watt/unit. Sehingga daya yang diperlukan sebesar 2 unit (*heater*) x 250 watt = 500 watt. Sehingga, waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan lembaran plastik dapat dihitung sebesar :

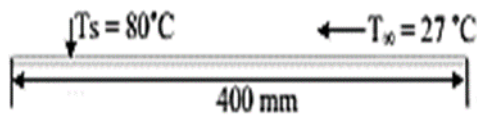
$$- Q_{udara} - Q_{plastik} = - P \cdot \Delta t$$

$$- 106 - 6989,86 = - 500 \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{7095,86}{500} = 14,19 \text{ detik}$$

2. Perhitungan waktu pendinginan lembaran plastik

Diasumsikan lembaran plastik berbentuk lembaran datar dan laju perpindahan kalor secara konveksi bebas atau alami.



Gambar 7. Proses Pendinginan Lembaran Plastik

Diketahui : $T_f = (80+27)/2 = 53,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 326,5 \text{ K}$

$$\beta = 1/(T_f) = 1/53,5 = 0,087$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$T_s = 80^\circ\text{C} \text{ (Temperatur plastik)}$$

$$T_\infty = 27^\circ\text{C} \text{ (Temperatur}$$

ruangan)

$$L = 0,4 \text{ m}$$

$$v = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,707$$

$$k = 0,0263 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

➤ Mencari Bilangan Grashof (GR)

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2}$$

$$= \frac{9,81 \cdot 0,0187 \cdot (80 - 27) \cdot 0,4^3}{(15,89 \times 10^{-6})^2}$$

$$Gr = 2,46 \times 10^9$$

➤ Mencari Bilangan Rayleigh (Ra = Gr . Pr)

$$Gr \cdot Pr = 2,46 \times 10^9 \cdot 0,707 = 1,74 \times 10^9$$

➤ Mencari Bilangan Nusselt (Nu)

Untuk, $Ra = Gr \cdot Pr = 1,74 \times 10^9$ Maka, didapat nilai : $c = 0,15$ dan $m = 1/3$

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^m$$

$$= 0,15 (1,74 \times 10^9)^{1/3}$$

$$= 180,42$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$= \frac{180,42 \cdot 0,0263}{0,4}$$

$$= 11,86 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$q = h \cdot A (T_s - T_\infty)$$

$$= 11,86 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot (0,4 \times 0,3) \text{ m}^2 \cdot (80 - 27) ^\circ\text{C}$$

$$= 75,4296 \text{ watt}$$

Didalam perancangan lembaran plastik yang sudah dibentuk didinginkan secara alami sampai temperatur $40 \text{ } ^\circ\text{C}$. Sehingga, kalor yang dilepaskan lembaran plastik sebesar :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$= \rho_{plastik} \cdot V_{plastik} \cdot c_{plastik} \cdot \Delta T$$

$$= 1,05 \text{ W/cm}^3 \cdot (40 \times 30 \times 0,05) \text{ cm}^3 \cdot 0,5 \text{ kal/gr} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (80 - 40) ^\circ\text{C}$$

$$= 1260 \text{ kal} = 5275,37 \text{ Joule}$$

Sehingga, waktu pendinginan lembaran plastik sebesar :

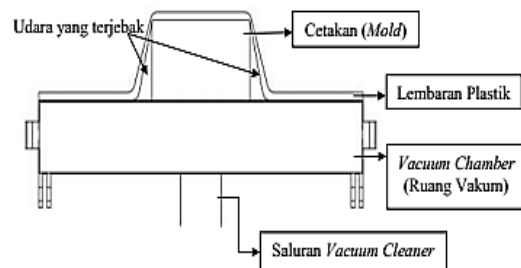
$$\Delta t = \frac{Q_{plastik}}{q} = \frac{5275,37}{75,4296} = 69,94 \text{ detik}$$

Tabel 2. Waktu Pemanasan dan Pendinginan

Ketebalan (mm)	Waktu Pemanasan (dt)	Waktu Pendinginan (dt)
0,5	14,19	69,94
0,6	16,99	83,93
0,8	22,58	111,90
1	28,17	139,88
1,2	33,76	167,85
1,5	42,15	209,81
1,8	50,54	251,78
2	56,13	279,75

3. Perhitungan waktu vakum lembaran plastik

Pada Perancangan mesin *vacuum forming* dengan maksimal cetakan $400 \times 300 \times 150 \text{ (mm}^3\text{)}$ untuk proses vakumnya membandingkan dengan mesin *vacuum forming* formech 686 dengan *Airflow* : $16 \text{ m}^3/\text{jam}$ ($0,0044 \text{ m}^3/\text{dt}$). Karena, semakin besar *airflow* (Q) maka semakin efisien waktu yang dibutuhkan untuk menghisap udara (vakum). Sehingga, dalam perancangan mesin *vacuum forming* ini menggunakan *vacuum cleaner Philips CompactGo Vacuum Cleaner with Bag FC8291/01* dengan spesifikasi *vacuum cleaner* adalah *vacuum* (max) : 20 kPa (20.000 Pa) dan *Airflow* (max) : $26,6 \text{ l/s}$ ($0,0266 \text{ m}^3/\text{dt}$). Perhatikan proses penghisapan udara pada (Gambar 8) dibawah ini :



Gambar 8. Proses Penghisapan Udara (Vakum)

Diketahui : $V_{vacum \text{ chamber}} = (396 \times 296 \times 51) \text{ mm}^3$

$$V_{udara} = (400 \times 300 \times 150) \text{ mm}^3$$

$$V_{plastik} = (400 \times 300 \times 0,005) \text{ mm}^3$$

$$\text{Aliran Udara (Q)} = 0,0266 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Sehingga, untuk menghitung waktu vakum adalah :

Waktu Vakum :

$$\frac{\text{Volume Vacuum Chamber} + \text{Volume Udara} + \text{Volume Plastik}}{\text{Aliran Udara (Q)}}$$

$$= \frac{(0,396 \times 0,296 \times 0,051) \text{ m}^3 + (0,4 \times 0,3 \times 0,15) \text{ m}^3 + (0,4 \times 0,3 \times 0,0005) \text{ m}^3}{0,0266 \frac{\text{m}^3}{\text{dt}}}$$

$$= 0,904 \text{ dt}$$

Tabel 3. Waktu Vakum

Ketebalan (mm)	Waktu Vakum (dt)
0,5	0,904
0,6	0,904
0,8	0,905
1	0,906
1,2	0,907
1,5	0,908
1,8	0,91
2	0,91

4. Cycle time process

Cycle time process adalah lamanya waktu yang dibutuhkan dalam menyelesaikan satu siklus untuk memproduksi sebuah produk. Perhitungan *Cycle time process* dari mesin vacuum forming ini dalam satu siklus untuk memproduksi sebuah produk dapat ditentukan dengan menjumlahkan hasil dari perhitungan waktu pemanasan, waktu pendinginan dan waktu vakum. Sehingga, lamanya *cycle time process* dapat dilihat pada (Tabel 4) adalah :

Tabel 4. Cycle Time Process

Parameter	Waktu (dt)
Pemasangan/meletakan cetakan (mold)	2 dt
Pemasangan lembaran plastik	3 dt
Pemanasan lembaran plastik	14,19 – 56,13 dt
Waktu vakum	0,904 – 0,91 dt
Pendinginan lembaran plastik	69,94 – 279,75 dt
Pelepasan lembaran plastik	3 dt
Waktu Minimal Cycle Time Process	93,034 dt
Waktu Maksimal Cycle Time Process	344,79 dt

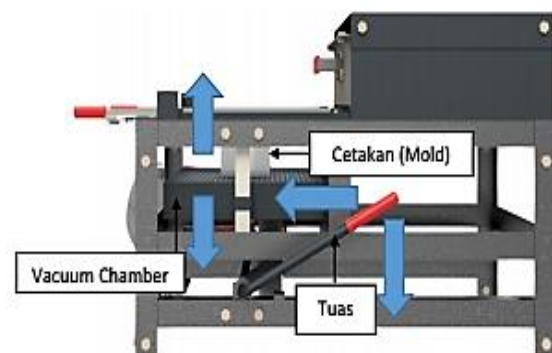
Jadi, lamanya waktu yang dibutuhkan untuk membuat satu produk (*cycle time process*) menggunakan mesin vacuum forming ini untuk bahan lembaran plastik polystyrene (PS) dengan ketebalan 0,5 mm adalah 93,034 detik

(1,55 menit) dan untuk ketebalan 2 mm adalah 344,79 dt (5,75 menit).

5. Mekanisme mesin vacuum forming

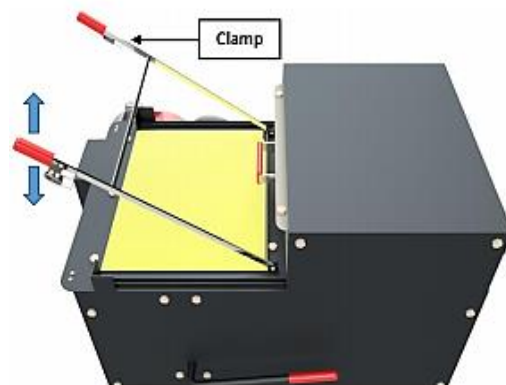
Prose mekanisme mesin vacuum forming berlangsung secara manual dimana masih memerlukan tenaga manusia (operator) untuk menjalankannya dalam proses produksinya. Bahan pengujian yang digunakan berupa lembaran plastik berjenis polystyrene (PS) dengan panjang 420 mm dan lebar 320 mm dengan ketebalan 0,5 sampai dengan 2 mm. Adapun mekanisme proses yang dilakukan antara lain adalah :

- Pertama menaikkan vacuum chamber keatas dengan cara menarik tuas disamping kanan mesin vacuum forming. Kemudian meletakan cetakan (mold) diatas vacuum chamber dan menurunkan kembali vacuum chamber keposisi awal.



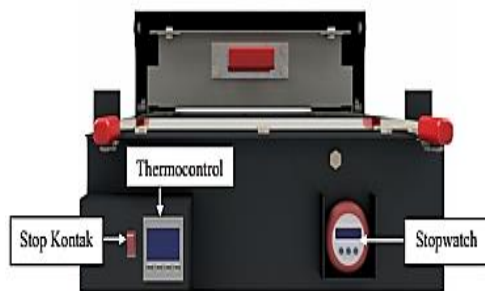
Gambar 9. Mekanisme Vacuum Chamber dan Tuas

- Selanjutnya mengangkat clamp keatas untuk meletakan lembaran plastik polystyrene diatas mesin vacuum forming yang kemudian lembaran plastik dijepit oleh clamp agar tidak bergeser/bergerak dari posisinya ketika proses pembentukan berlangsung.



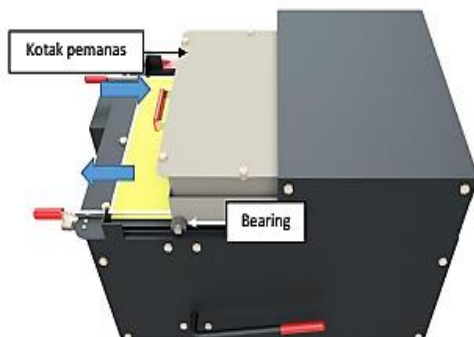
Gambar 10. Mekanisme Penjepit (Clamp)

- c. Sebelum melakukan proses pemanasan terlebih dahulu disetting berapa lama waktu pemanasan pada *stopwatch digital* dan berapa temperatur kotak pemanas (*heater*) pada *thermocontrol* dengan input sensor *thermocouple*, sehingga proses pemanasan dapat berlangsung dengan sempurna. Lamanya waktu pemanasan dipengaruhi oleh jenis lembaran plastik dan ketebalan lembaran plastik yang digunakan.



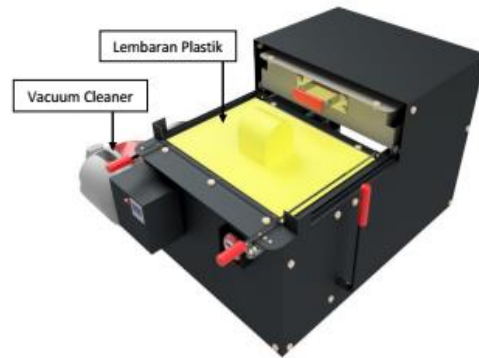
Gambar 11. Stopwatch dan Thermocontrol

- d. Selanjutnya kotak pemanas dapat ditarik kedepan dengan bantuan 4 buah *bearing* dibawahnya untuk melakukan proses pemanasan sampai lembaran plastik menjadi lunak (tidak meleleh). Setelah proses pemanasan selesai kotak pemanas dapat didorong kebelakang untuk dikembalikan ke posisi awal.



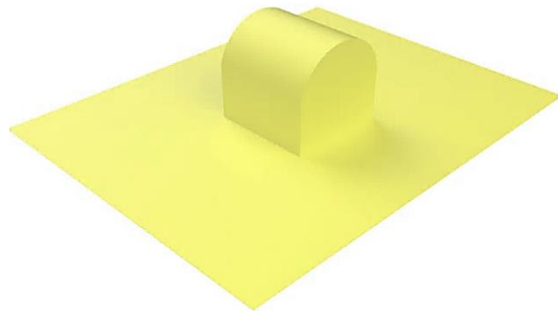
Gambar 12. Mekanisme Kotak Pemanas

- e. Setelah lembaran plastik menjadi lunak, *vacuum chamber* akan naik keatas sehingga cetakan (*mold*) akan mengenai lembaran plastik untuk proses pembentukan dan disaat yang bersamaan *vacuum cleaner* akan dihidupkan untuk menghisap (vakum) udara didalam *vacuum chamber* dan udara yang terjebak diantara lembaran plastik dan *vacuum chamber*.



Gambar 13. Proses Pembentukan dan Vakum

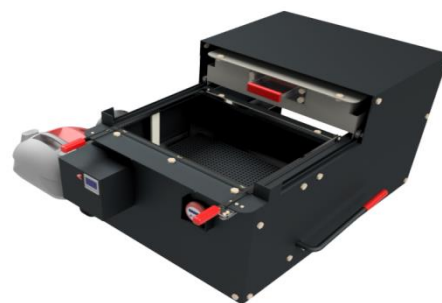
- f. Setelah proses pembentukan selesai, *vacuum cleaner* dimatikan dan *vacuum chamber* diturunkan. Selanjutnya, *clamp* yang menjepit lembaran plastik diangkat keatas untuk mengeluarkan lembaran plastik yang sudah selesai dibentuk.



Gambar 14. Lembaran Plastik Setelah Proses Vacuum Forming

6. Spesifikasi mesin *vacuum forming*.

Hasil perancangan dengan membandingkan mesin Formech 686 dan menggunakan metode perancangan secara rasional untuk mesin *vacuum forming* dapat digambarkan secara 3 dimensi dengan *software autodesk inventor professional 2016* seperti gambar dibawah ini:



Gambar 15. Disain 3D Mesin Vacuum Forming

Tabel 5. Spesifikasi Mesin *Vacuum Forming*

Dimensi Mesin	562 x 880 x 496 (mm ³)
<i>Vacuum (max)</i>	20 kPa (20.000 Pa)
<i>Airflow (max)</i>	26,6 l/s (0,0266 m ³ /dt)
Dimensi Maksimal Cetakan	300 x 400 x 150 (mm ³)
Dimensi Maksimal Plastik	420 x 320 (mm ²)
Temperatur Maksimal <i>Heater</i>	400 °C
Konsumsi Daya	<i>Vacuum Cleaner</i> : 1000 Watt <i>Heater</i> : 500 Watt

5. Kesimpulan

Hasil perancangan untuk Biaya desain dan pembuatan atau proses produksi mesin *vacuum forming* ini, relatif murah sesuai dengan kebutuhan industri-industri kecil atau UKM.

Hasil perancangan untuk proses pembentukan lembaran plastik dengan mesin *vacuum forming* dari desain ini dapat dilakukan dengan mudah sehingga tidak diperlukan operator yang memiliki keahlian khusus.

Daftar Pustaka

Carraher, Charles E. (2006). Polymer Chemistry Seventh Edition. New York: Taylor & Francis Group, LLC.

Cengel, Yunus A. (2003). Heat Transfer : A Practical Approach Second Edition. New York: McGraw-Hill.

Cengel, Yunus A and Dr. Boles, Michael A. (1994). Thermodynamics An Engineering

Approach Second Edition. USA : McGraw-Hill, Inc.

Firdaus dan Soejono Tjitro. (2002). Jurnal Teknik Mesin : Cacat Penyusutan Pada Pneumatics Holder. Palembang : Teknik Mesin Politeknik Sriwijaya.

Ghani, A. K. et al. (2014). Mampu Bentuk Plastik Pada Proses Vacuum Forming Dengan Variasi Tekanan 0.979 bar, 0.959 bar, 0,929 bar, 0,909 bar Pada Temperatur 200 °C. Semarang: Universitas Diponegoro.

Hassan, Nik Ruqiyah Nik. et al. (2016). Preparation of polypropylene thermoplastic container via thermoforming process. Malaysia : Faculty of Manufacturing Engineering, Universiti Malaysia Pahang.

Mervat. et al. (2010). Plastic Injection Technology. Shoubra : Faculty of Engineering, Benha University.

Michael J, Moran., Howard N. Shapiro. (2004). Termodinamika Teknik Jilid 1. Jakarta: Erlangga.

Mujiarto, Imam. (2005). Sifat dan Karakteristik Material Plastik dan Bahan Adiktif. Semarang: AMNI Semarang.

Nusyirwan. (2007). Rekayasa Mesin Thermoforming Vacuum. Padang: Politeknik Negeri Padang.

Rosato Donald V., David P, Dimatha, dan V Dominick. (1991). Designing with Plastics and Composites: A Handbook. New York : Van Nostrand Reinhold.

Stevens, M. P. (2001). Kimia Polimer. Diterjemahkan oleh Iis Sopyan. Jakarta: Pradya Paramita.

Theodore, Louis. (2011). Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. New Jersey: John Wiley & Sons, inc.