

Rancang Bangun Mesin *Vacuum Forming*

Daffa Adli Munandar¹, Fahmi Haidi¹, Muslimin²

¹Program Studi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jalan Prof. Dr. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok 16425. No Tlp (021) 7270036, Fax (021) 7270036,
daffa.adli@ymail.com, fahmi.haidi@gmail.com

²Program Studi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta

Abstrak

Thermoforming adalah metode pembentukan lembaran plastik melalui proses pemanasan dan pembentukan dengan proses vacuum. Mesin vacuum forming merupakan mesin yang menggunakan metode thermoforming dalam membentuk lembaran plastik. Mesin Vacuum Forming ini memiliki fleksibilitas tinggi yang mampu membuat produk berbahan dasar lembaran plastik menjadi berbagai macam bentuk sesuai keinginan pengguna. Penelitian ini membahas tentang rancang bangun mesin Vacuum Forming yang menggunakan metode thermoforming yang cocok untuk skala UKM. Proses rancang bangun meliputi perhitungan spesifikasi kebutuhan, merancang sistem dan komponen sesuai dengan metode kerja mesin vacuum forming semi-otomatis. Metode kerja mesin Vacuum Forming ini adalah dengan meletakkan lembaran plastik pada clamp kemudian dipanaskan pada heater hingga mencapai temperatur glass transition lembaran plastik. Clamp akan bergerak keatas mold yang terdapat pada vacuum chamber untuk proses pembentukan. Proses pembentukan dilakukan dengan menghisap udara yang terjebak diantara lembaran plastik dan mold dengan bantuan pompa vacuum yang terdapat dibawah vacuum chamber sehingga lembaran plastik akan mengikuti bentuk mold. Plastik yang sudah terbentuk dapat dilepas dari cetakan dan bagian yang tidak digunakan akan dipotong untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan. Mold pada mesin ini dapat di ganti sesuai dengan keinginan pengguna sehingga mesin ini dapat menghasilkan produk sesuai dengan keinginan pengguna.

Kata Kunci: *thermoforming, vacuum forming, plastik*

Abstract

Thermoforming is one of many method to forming plastic sheet using heat and pressure for forming process. Vacuum Forming Machine is a machine that use thermoforming method in forming a plastic sheet. Vacuum forming is a thermoforming method which use vacuum pressure to form the plastic. Vacuum forming machine has high flexibility to produce plastic sheet to various kind of form as the user desired. This research is about Vacuum Forming Machine design with thermoforming method which suitable for UKM. The design process followed by specification determining, system designing and components selecting. Vacuum Forming Machine working by placing plastic sheet into clamp and then move it to heater until the plastic reach glass transition temperature.the clamp will bring the plastic sheet over the mold and cover the mold. The trapped air between plastic sheet and mold will be sucked by vacuum pump below the mold so the plastic sheet form will follow the mold. Formed Plastic sheet can be unload from the clamp and then will be trimmed to get desired part. The mold in this machine can be replaced easily depends on user.

Keywords: *Thermoforming, vacuum forming, plastic*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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 diinginkan[1]. Penggunaan plastik dalam kehidupan sehari-hari sangat sering dijumpai dalam berbagai bidang, mulai dari produk rumah tangga, mainan anak – anak hingga kemasan suatu produk atau makanan. Kebutuhan akan produk berbahan dasar plastik dapat ditemukan pada kegiatan Usaha Kecil Menengah (UKM).

Salah satu metode pembentukan plastik yang biasa digunakan ialah *thermoforming*. *Thermoforming* merupakan proses yang pertama digunakan pada industri plastik untuk membentuk lembaran selulosa nitrat pada pertengahan tahun 1800. *Thermoforming* adalah proses pembentukan lembaran polymer thermoplastic menjadi bentuk yang baru menggunakan panas dan tekanan [2]. Mesin *vacuum forming* merupakan mesin yang menggunakan metode *thermoforming* dalam proses pembentukan lembaran plastik menjadi suatu produk. Mesin ini cocok digunakan dalam kegiatan Usaha Kecil Menengah (UKM) karena membutuhkan tekanan yang rendah yaitu kurang dari 14 [Psi] dan tidak memerlukan peralatan yang banyak seperti kebanyakan proses pembentukan plastic lain sehingga tidak membutuhkan biaya yang besar.[2][3]

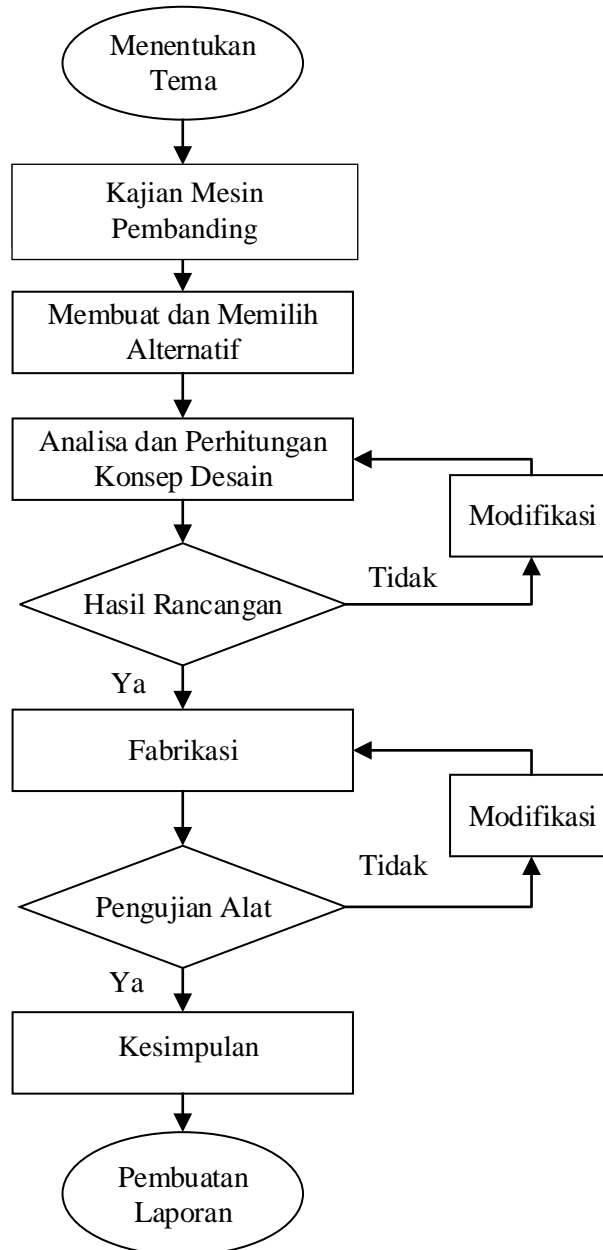
Ezform Lv 1827 *Vacuum Forming Machine* merupakan mesin *vacuum forming* yang dijual dipasaran dengan dimensi mesin 762 x 762 x 533 [mm] dan berat 30 [kg] serta terdapat dua buah elemen pemanas dengan total konsumsi daya 3000 [watt]. Mesin ini dapat menggunakan segala jenis lembaran plastik dengan ukuran maksimal 540 x 768 [mm]. Namun, mesin ini membutuhkan pompa *vacuum* atau *vacuum cleaner* karena tidak langsung terdapat pada paket penjualan. Harga mesin ini relatif mahal sebesar Rp. 29.541.595.

Rancang bangun mesin *thermoforming* yang dilakukan oleh Nugraha (2009) menunjukkan bahwa plastik jenis *polyvinyl chloride* (PVC) *rigid sheet* dengan ketebalan 0,2 – 0,5 mm sesuai untuk kebutuhan *thermoforming* dan dapat diproses pada temperatur kerja 150 [oC] dengan pemanasan selama 35 – 90 detik. Namun demikian mesin ini masih memiliki kekurangan dalam hal elemen *heater* tidak awet, pompa *vacuum* mengalami dua kali kerusakan dalam kurun waktu enam bulan, plat lubang *vacuum* bergoyang saat akan dinaikkan sehingga berpotensi merusak pola, rel pada *heater* yang tidak sejajar ketika melakukan proses membuka dan menutup, *clamp* pengunci yang tidak dapat diatur tingkat kekencangannya (tingkat defect 10%). [4][5]

Berdasarkan kekurangan dari mesin *vacuum forming* merk EZform Lv 1827 dan mesin *thermoforming* yang dibuat oleh Nugraha pada tahun 2009 dilakukan pengembangan rancang bangun *vacuum forming* yang lebih murah dan lebih mudah digunakan agar cocok untuk kegiatan UKM. Tugas akhir ini mengembangkan rancang bangun mesin *vacuum forming* untuk proses pembentukan plastik kemasan makanan skala UKM. Mesin *Vacuum Forming* memiliki dimensi 570 x 570 x 1460 [mm] dengan ukuran cetakan maksimal 400 x 400 x 200 [mm]. *Heater* mesin *vacuum forming* ini didesain dengan suhu maksimal 300 [°C] dan pompa *vacuum* bertekanan 20 [kPa]. Sistem kontrol mesin ini adalah semi otomatis berbasis Arduino.

2. METODE RANCANG BANGUN

Rancang bangun mesin *vacuum forming* dibuat menggunakan metode yang ditunjukkan pada diagram alir dibawah ini :



Gambar.1 Diagram Alir Metode Rancang Bangun




2.1. Menentukan Tema

Pada penelitian ini tema yang diangkat ialah proses pembentukan plastik menggunakan metode *thermoforming* dengan jenis *Vacuum Forming* untuk skala Unit Kegiatan Menengah (UKM).

2.2. Kajian Mesin Pemanding

Berdasarkan mesin yang sudah ada di pasaran diidentifikasi spesifikasi, kelebihan dan kekurangan pada mesin yang sudah ada untuk dikembangkan fitur dan spesifikasinya untuk meningkatkan nilai ekonomis dan kemudahan dalam sistem operasi mesin.

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Pemanding

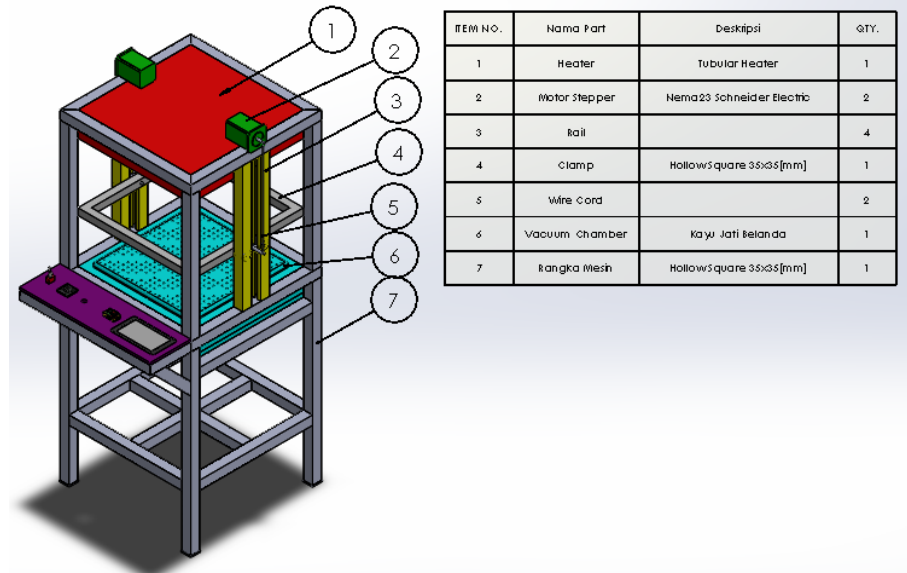
Nama Mesin	Formech 508FS <i>Vacuum Forming</i>	Ezform Lv 1827 <i>Vacuum Forming Machine</i>	CR Clarke <i>Vacuum Former</i> 725 FLB
Gambar			
Daya	4220 watt	3000 Watt	1850 Watt
Tekanan <i>Vacuum</i>	-5 bar	<i>Vacuum cleaner</i>	-0.86 bar
Dimensi	757x1474x1140 [mm]	889x534x762 [mm]	615x880x590 [mm]
Berat	125 [kg]	30 [kg]	56 [kg]
<i>Forming Area</i>	482x432 [mm]	457 x 686 [mm]	228 x 423 [mm]
<i>Voltage</i>	208 – 240 V	210 - 240 V	220 – 240 V
Tebal plastik maks	6 [mm]	Tidak ada keterangan	6 [mm]
Harga	Rp. 171,221,094	Rp. 29,244,105	Rp. 36,781,965

Tabel 2. Kelebihan dan kekurangan Mesin Pemanding

Nama Mesin	Kelebihan	Kekurangan
Formech 508FS <i>Vacuum Forming</i>	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki pompa <i>vacuum</i> dengan kapasitas 5 [-bar] Sistem <i>heater</i> yang mudah digunakan Terdapat kontrol otomatis pada tekanan dan suhu Mudah melepas plastik dengan udara dari pompa yang mendorong plastik agar terlepas Terdapat kontrol berbasis PLC 	<ul style="list-style-type: none"> Daya 4220 Watt tidak cocok untuk skala UKM Beban mesin yang besar 125 [kg] Harga mesin relatif mahal untuk skala UKM Tidak ada kontrol otomatis pada pergerakan <i>clamp</i>
Ezform Lv 1827 <i>Vacuum Forming Machine</i>	<ul style="list-style-type: none"> Beban yang ringan sebesar 30 [kg] Dapat diletakkan di atas meja Mudah dipindahkan 	<ul style="list-style-type: none"> Daya 3000 Watt tidak cocok untuk skala UKM Tidak terdapat pompa <i>Vacuum</i> Harga mesin relatif mahal untuk skala UKM Tidak ada kontrol otomatis pada pergerakan <i>clamp</i>
CR Clarke <i>Vacuum Former</i> 725 FLB	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki pompa <i>vacuum</i> dengan kapasitas 0,86 [-bar] Terdapat kontrol otomatis pada waktu pemanasan Mudah melepas plastik dengan udara dari pompa yang mendorong plastik agar terlepas 	<ul style="list-style-type: none"> Daya 1850 Watt tidak cocok untuk skala UKM Harga mesin relatif mahal untuk skala UKM Tidak ada kontrol otomatis pada pergerakan <i>clamp</i>

2.3. Konsep Rancangan

Alternatif Rancangan dibuat untuk membandingkan kelebihan dan kekurangan dari spesifikasi rancangan yang dibuat. Terdapat tiga buah alternatif rancangan pada penelitian ini, berikut adalah alternatif yang dibuat ;



Gambar 1. Konsep Rancangan

Spesifikasi :

- Menggunakan pompa *vacuum* bertekanan 20 [kPa]
- Suhu Maksimal *Heater* 300 [°C]
- Motor servo sebagai sumber daya penggerak *clamp*
- Sistem kontrol otomatis pada *heater* dan *clamp* berbasis Arduino
- Indikator suhu
- *Forming Area* 450 x 450 [mm]
- Profil Rangka *Hollow Square* 35 x 35 [mm]
- Dimensi Mesin 570 x 570 x 1420 [mm]

2.4. Analisa Konsep Rancangan

Alternatif rancangan yang telah dibuat akan di pilih salah satu untuk digunakan sebagai rancangan dari mesin *vacuum forming* yang akan dibuat. Analisa dan perhitungang dilakukan untuk menentukan spesifikasi dari tiap komponen mesin yang akan digunakan. Beberapa rumus yang digunakan dalam analisa dan perhitungan diperoleh dari literatur, jurnal dan katalog.

2.4.1. Tegangan Tarik[6]

Tegangan tarik adalah nama yang diberikan terhadap sebuah gaya yang mencoba untuk menarik sesuatu hingga putus. Ketika gaya eksternal atau beban bekerja pada sebuah benda, maka gaya gaya internal terbentuk pada penampang yang bervariasi dari benda, gaya menahan gaya gaya dari luar. Gaya internal persatuan luas penampang dari benda diketahui sebgai tegangan.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad [1]$$

σ_t =Tegangan tarik [N/m^2]

F =Gaya [N]

A =Luas Penampang [m^2]

2.4.2. Tegangan Geser[6]

Ketika sebuah benda atau bodi mengalami pembebanan dua gaya yang berlawanan arah, yang bekerja secara tangensial melintang penampang yang menahan, akibatnya bodi tersebut cenderung menggantung penampang tersebut, kemudian tegangan yang terjadi disebut tegangan geser.

$$\tau_g = \frac{F_{geser}}{A} \quad [2]$$

τ_g =Tegangan geser [N/m^2]

F_{geser} = Gaya geser[N]

A = luasan penampang geser[m^2]

2.4.3. Tegangan Bending[6]

Pada tegangan bending gaya gaya yang bekerja pad sebuah batang atau bodi tidak pada titik berat penampang dari batang yang bersangkutan, sehingga reaksi yang muncul pada tumpuan berupa gaya reaksi yang kombinasi.

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma_{bt}}{y} = \frac{E}{R} \quad [3]$$

σ_{bt} =Tegangan Bending

M =momen bending pada penampang yang ditentukan

I =momen inertia penampang lintang sekitar sumbu sentral

y =jarak dari permukaan netral ke lapisan paling luar

E =modulus elastisitas dari material beam

R = Radius lengkungan beam

2.4.4. Tegangan Puntir[6]

Ketika sebuah elemen mesin mengalamu dua gaya yang sama dan pasangan yang berlawan arah yang bekerja dalam bidang yang sejajar (torsi atau momen puntir), maka elemen mesin dikatakan mengalami torsi atau momen. Tegangan yang diakibatkan olehnya disebut tegangan geser torsional atau tegangan puntir.

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau_p}{r} = \frac{C.\theta}{l} \quad [4]$$

T = torsi atau momen puntir[Nm]

J =momen inertia polar [m^4]

τ_p =tegangan puntir[N/m^2]

r = jari jari poros[mm]

C =modulus kekakuan

l =panjang poros[m]

θ =sudut puntiran pada panjang l [rad]

2.4.5. Hukum Pertama Termodinamika[8]

Hukum pertama termodinapika lebih deikanal sebagai kekaln energi. Suatu bentuk kekekalan energi yang lebih umum memasukkan efek – efek perpindahan kalor dan perubahan energi internal. Hukum pertama termodinamika dirumuskan untuk suatu siklus : perpindahan kalor netto adalah sama dengan usaha netto yang dihasilkan untuk suatu sistem siklus.

$$\Sigma W = \Sigma Q$$

Proses volume konstan : $Q = m \cdot C_v \cdot \Delta T$ [7]

Proses tekanan konstan : $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$ [8]

ΣQ =total kalor [joule]

ΣW =total usaha [joule]

C_v = kalor jenis pada volume konstan [$J/kg.K$]

C_p = kalor jenis pada tekanan konstan [$J/kg.K$]

m =beban equivalent [kg]

ΔT = kecepatan putar [K]

2.4.6. Perpindahan Panas Konveksi[9]

Konveksi adalah perpindahan panas antara permukaan benda padat dengan fluida yang bergerak dan konveksi meliputi kombinasi dari efek konduksi dan pergerakan fluida.

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad [9]$$

Q_{conv} =Laju perpindahan panas konveksi [Joule]

h = koefisien perpindahan panas konveksi [W/m^2K]

A = Luas Permukaan [mm^2]

T_s = Temperatur permukaan benda padat [K]

T_f = Temperatur fluida disekitar benda padat [K]

2.5. Fabrikasi

Fabrikasi rancangan mesin *vacuum forming* dilakukan di bengkel *Shell Eco Marathon* Politeknik Negeri Jakarta dengan menggunakan mesin konvensional yang tersedia. Rangka Alat menggunakan baja profil *hollow square* JIS G3466 STKR400, bagian *vacuum chamber* menggunakan kayu jati balanda, dan elemen pemanas pada *heater* menggunakan *heater* jenis tubular.

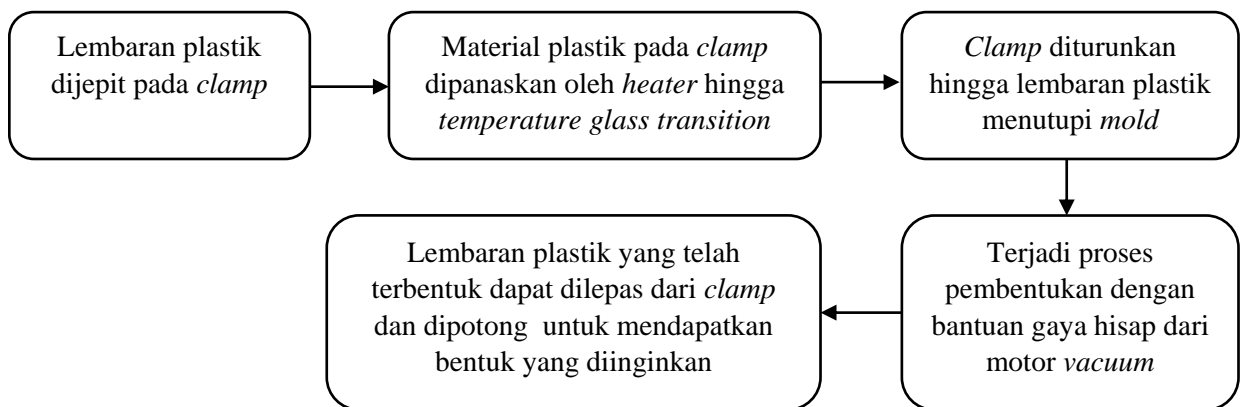
2.6. Pengujian Alat

Pengujian Mesin *Vacuum Forming* yang telah dibuat dilakukan untuk mengetahui apakah mesin dapat bekerja sesuai dengan yang dirancang atau tidak. Uji coba dilakukan dengan membentuk lembaran PVC *Rigid* dengan tebal 0,5 [mm] Beberapa komponen alat di uji seperti *heater*, motor *vacuum*, sistem gerak *clamp*, sistem penguncian *clamp* dan geometri dari hasil produk yang didapat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Prinsip Kerja Alat

Mesin *Vacuum Forming* yang akan dirancang hanya dapat menggunakan lembaran plastik sebagai bahan baku produk. Lembaran plastik dengan ukuran 500 x 500 [mm] dijepit pada *clamp* lalu kemudian di panaskan oleh *heater* yang ada di bagian atas mesin hingga *temperature glass transition*. Kemudian *clamp* diturunkan agar lembaran plastik menutupi *modal* yang ada di atas *vacuum chamber* untuk proses pembentukan. Proses pembentukan dilakukan dengan menghisap udara yang terjebak diantara lembara plastik dan *modal* sehingga lembaran plastik akan mengikuti bentuk *modal*. Lembaran plastik yang sudah terbentuk dapat dilepas dari *clamp* dan dipotong untuk mendapatkan bagian yang di inginkan.



Gambar 2. Prinsip Kerja Alat

3.2. Rancangan Alat

Rancangan Mesin *Vacuum Forming* ini terdiri dari 5 buah bagian utama, yaitu *clamp*, *heater*, *vacuum chamber* pompa *vacuum* dan motor servo. Bagian bagian tersebut di letakkan pada rangka dengan baja profil *hollow square* berukuran 400 x 400 [mm] dengan tebal 1 [mm] untuk menopang setiap bagian pada mesin *vacuum forming*.

a) *Clamp*

Clamp berfungsi sebagai tempat meletakkan lembaran plastik yang akan dibentuk. *Clamp* dibuat dari baja profil *hollow square* berukuran 300 x 400 x 0,9 [mm]. *Clamp* dapat bergerak naik dan turun secara otomatis dengan sumber gerak motor servo yang di kontrol otomatis menggunakan Arduino.

b) *Heater*

Heater berfungsi untuk memanaskan lembaran plastik hingga *temperature glass transition*. *Heater* ini dibuat dengan menggunakan elemen pemanas tubular *heater* dengan diameter 8 [mm] yang dapat menghasilkan suhu hingga 300 [°C] dengan daya 1200 Watt. *Heater* ini memiliki peredam panas dari bahan yang memiliki sifat isolator agar panas yang dihasilkan tidak merambat ke komponen mesin yang lain.

c) *Vacuum Chamber*

Vacuum chamber berbentuk balok dengan ukuran 500 x500x8,5 [mm] yang dibuat menggunakan kayu jati belanda. bagian atas *vacuum chamber* terdapat lubang lubang ber diameter 1 [mm] agar pompa *vacuum* dapat menghisap lembaran plastik yang berada diatas *vacuum chamber* sehingga terjadi proses pembentukan

d) Pompa *Vacuum*

Pompa *Vacuum* merupakan sumber daya dari proses pembentukan pada mesin ini. Pompa *vacuum* yang di gunakan memiliki tekanan *vacuum* hingga 20 kPa dengan daya 240 Watt. Pompa *vacuum* diletakkan dibawah *vacuum chamber* agar dapat membuat ruang didalam *vacuum chamber* dalam

keadaan *vacuum* sehingga lembaran plastik yang ada diatas *vacuum chamber* dapat terhisap dan mengikuti bentuk dari *mold*.

e) Motor Servo

Motor servo berfungsi sebagai sumberdaya dalam gerakan naik dan turun *clamp* yang menjepit plastik. Motor servo memiliki *holding* Torsi 9 [kg/cm] dengan daya 7,4 Watt dua fasa. Motor servo di kontrol dengan sistem yang berbasis arduino.

3.3. Analisa Rancangan Alat

Analisa dilakukan untuk mengetahui waktu pemanasan dan pendinginan pada satu kali proses pembuatan produk.

3.3.1. Analisa Kalor pada Udara (Q_{udara})

$$Q_{udara} = m \cdot cv \cdot \Delta T \quad [7]$$

$$Q_{udara} = (1,614 [kg/m^3] \cdot 0,0177 [m^3]) \cdot 718 [J/kg^\circ C] \cdot (150 - 27) [^\circ C]$$

$$Q_{udara} = 1815,4514 [Joule]$$

3.3.2. Analisa Jumlah Kalor pada Material *Polyvinyl chloride rigid sheet* (Q_{PVC})

Suhu awal udara sebesar 27 [°C] dipanaskan hingga suhu 150 [°C]. Volume material *polyvinyl chloride rigid sheet* sebesar 0,00008 [m³] ($c_{pPVC} = 2512,0789 [J/kg^\circ C]$; $\rho_{PVC} = 1350 [kg/m^3]$)

Sehingga, Q_{PVC} adalah:

$$Q_{PVC} = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad [8]$$

$$Q_{PVC} = (1350 [kg/m^3] \cdot 0,00008 [m^3]) \cdot 2512,0789 [J/kg^\circ C] \cdot (150 - 27) [^\circ C]$$

$$Q_{PVC} = 33370,4561 [Joule]$$

3.3.3. Analisa Waktu Pemanasan Plastik *Polyvinyl chloride rigid sheet*

$$(Q_{udara} + Q_{PVC}) = P_{Heater} \times t_{PVC} \quad [9]$$

$$(1815,4514 [Joule] + 33370,4561 [Joule]) = 1200 [Watt] \times t_{PS}$$

$$t_{PVC} = 29,3216 [s] \approx 30 [s]$$

3.3.4. Analisa Kalor Konveksi Material plastik

$$Q_{Konveksi} = h \times A \times (T_2 - T_1) \quad [9]$$

$$Q_{Konveksi} = 12,4312 [W/m^2 K] \times 0,16 [m^2] \times (150 - 27) [^\circ C]$$

$$Q_{Konveksi} = 244,646 [Watt]$$

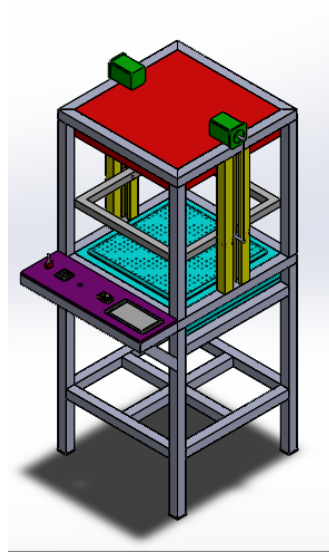
3.3.5. Analisa Waktu Pendinginan *Polyvinyl chloride rigid sheet*

$$Q_{PVC} = Q_{Konveksi} \times t \quad [9]$$

$$\therefore t = 33370,4561 [Joule] / 244,646 [Watt]$$

$$t = 136,4 [s] \approx 137 [s]$$

4. KESIMPULAN



Gambar 3. Hasil Rancangan Mesin Vacuum Forming

Simpulan yang dapat diambil dari rancang bangun mesin *vacuum forming* ini adalah sebagai berikut :

1. Mesin *vacuum forming* memiliki dimensi 580 x 580 x 1420 [mm]
2. Konsumsi daya mesin *vacuum forming* sebesar 2000 [watt]
3. Suhu maksimal *heater* 300 [°C]
4. Waktu pemanasan yang diperlukan untuk mencapai *temperature glass transition* adalah 14 [s]
5. Waktu pendinginan dari material setelah di *forming* adalah 51 [s]
6. Dengan asumsi waktu *setup* 15 detik untuk memasang dan melepas plastik dari *clamp*, maka waktu produksi 1 buah produk adalah 80 [s]

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nusyirwan, "Rekayasa mesin *thermoforming* vaccum," *J. Ilm. Poli Rekayasa*, vol. 2, 2007.
- [2] P. W. Klein, *Fundamentals of Plastics Thermoforming*. Synthesis Lectures on Materials Engineering, 2009.
- [3] A. M. Prakash, P. S. Mahadeo, N. G. Vitthal, D. Ramchandra, and G. P. Ashok, "Design & Development of Vaccum *Forming Machine*," no. 1, pp. 20–24, 2016.
- [4] R. A. Setiawan, "Perancangan ulang mesin *thermoforming* menggunakan metode pendekatan sistematis," 2017.
- [5] B. P. Nugraha, "Mesin *thermoforming* untuk cetakan cokelat," 2009.
- [6] A. E. Pramono, *Elemen Mesin I*, 1st ed. Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta, 2015.
- [7] A. E. Pramono, *Elemen Mesin II*, 1st ed. Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta, 2015.
- [8] P. Merle C and S. Craig W, *Schaum's Outlines Termodinamika Teknik*, Edisi Kedu. Jakarta: Erlangga, 2011.
- [9] Y. A. Cengel, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 5th Editio., vol. 5th Editio. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2008.