

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PEMBENTUKAN
POLYCARBONATE PADA PROSES *VACUUM FORMING***



**Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Menyelesaikan Program Studi Strata 1
Pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik**

Oleh :

ADI NUGROHO

D 200 160 203

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2020**

HALAMAN PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PEMBENTUKAN
POLYCARBONATE PADA PROSES *VACUUM FORMING***

PUBLIKASI ILMIAH

oleh:

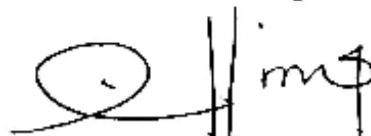
ADI NUGROHO

D 200 160 203

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen

Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Al Fatih Hendrawan', written over a vertical line that extends from the text below.

Muhammad Al Fatih Hendrawan, S.T., M.T.

HALAMAN PENGESAHAN

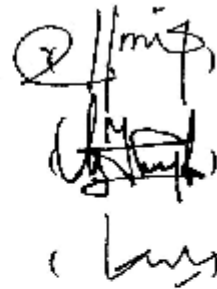
**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PEMBENTUKAN
POLYCARBONATE PADA PROSES VACUUM FORMING**

OLEH
ADI NUGROHO
D 200 160 203

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Selasa, 18 Agustus 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. **Muhammad Al Fatih Hendrawan, S.T., M.T.**
(Ketua Dewan Penguji)
2. **Ir. Agus Hariyanto, M.T.**
(Sekertaris Dewan Penguji)
3. **Tri Widodo Besar R, S.T., M.Sc., Ph.D**
(Anggota Dewan Penguji)





Dekan,

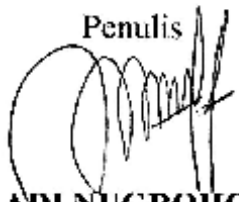

Adi Nugroho, M.T., Ph.D., IPM,
NIK. 682

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 10 September 2020

Penulis

ADI NUGROHO
D 200 160 203

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PEMBENTUKAN POLYCARBONATE PADA PROSES VACUUM FORMING

Abstrak

Plastik merupakan suatu material yang banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Karena mempunyai beberapa keunggulan sifatnya yang mudah dibentuk, ringan, tahan karat, sebagai isolator listrik yang baik, beberapa plastik mempunyai sifat fisik yang transparan. Ini sangat berguna untuk penggunaan plastik sebagai bahan pembungkus suatu produk, maka dari itu dilakukan berbagai penelitian untuk mengetahui karakteristik suatu bahan plastik dengan perlakuan panas, dan menghasilkan alat manufakturnya. Salah satu metode pembentukan dengan perlakuan panas adalah *thermoforming* dan yang sederhana adalah *vacuum forming*. Metode ini dilakukan dengan memberikan perlakuan panas pada lembaran plastik hingga plastik menjadi lunak kemudian dibentuk pada cetakan sesuai yang dikehendaki dengan memberikan tekanan vakum. Pada penelitian ini menggunakan lembaran plastik dengan jenis *polycarbonate* (PC) berukuran 500 mm x 300 mm dengan ketebalan 1,5 mm. Untuk tekanan vakum ditentukan pada tekanan konstan sebesar -0,39 bar. Dan untuk mencetak plastik dengan kualitas optimal digunakan temperatur yang divariasikan menjadi 3 variasi temperatur yaitu: 155.5°C, 160.5°C dan 165.5°C. Dari hasil penelitian diperoleh temperatur optimal untuk mencetak plastik polycarbonate dengan tebal 1,5 mm adalah 160.5°C dengan tekanan vakum -0,39 bar.

Kata kunci: *thermoforming, vacuum forming dan polycarbonate (PC).*

Abstract

Plastic is a material that is often found in everyday life. Because it has several advantages of being malleable, lightweight, corrosion resistant, as a good electrical insulator, some plastics have transparent physical properties. This is very useful for the use of plastic as a wrapping material for a product, therefore various studies have been carried out to determine the characteristics of a plastic material with heat treatment, and to produce a manufacturing tool. One method of forming by heat treatment is thermoforming and the simple one is vacuum forming. This method is carried out by giving a heat treatment to the plastic sheet until the plastic becomes soft and then molded into the desired mold by applying vacuum pressure. In this study, using a plastic sheet with the type of polycarbonate (PC) measuring 500 mm x 300 mm with a thickness of 1.5 mm. For the vacuum pressure is determined at a constant pressure of -0.39 bar. And to print plastics with optimal quality, temperature variations are used which

are varied into 3 temperature variations, namely: 155.5° C, 160.5° C and 165.5° C. The results showed that the optimal temperature for printing polycarbonate plastic with a thickness of 1.5 mm is 160.5° C with a vacuum pressure of -0.39 bar.

Keywords: *thermoforming, vacuum forming and polycarbonate (PC).*

1. PENDAHULUAN

Plastik merupakan suatu material yang banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari peralatan makan, botol minuman, mainan, *furniture*, otomotif, 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. Ini sangat berguna untuk penggunaan plastik sebagai bahan pembungkus suatu produk, karena dengan pembungkus yang transparan dan mempunyai bentuk menyerupai produk. Maka dari itu dilakukan berbagai penelitian untuk mengetahui karakteristik suatu bahan plastik dengan perlakuan panas, dan menghasilkan alat manufakturnya. Salah satu metode pembentukan dengan perlakuan panas adalah *thermo forming*.

Proses *thermoforming* merupakan salah satu metode pembentukan material plastik yang paling tua dan paling banyak digunakan. Prosesnya yang cukup sederhana dapat digunakan dalam pembentukan suatu produk dengan berbagai macam jenis material, salah satunya adalah polimer atau biasa disebut plastik yang mempunyai sifat *thermoplastic*. Pada umumnya proses *thermoforming* dengan material plastik menggunakan mesin *injection molding* dan *blow injection molding* yang mampu memproduksi produk dalam skala besar. Akan tetapi investasinya yang cukup tinggi jika produksi dalam skala besar akan menjadi keterbatasan untuk kalangan tertentu. Oleh karena itu peneliti memilih metode *vacuum forming* yang dinilai mempunyai biaya produksi yang lebih rendah.

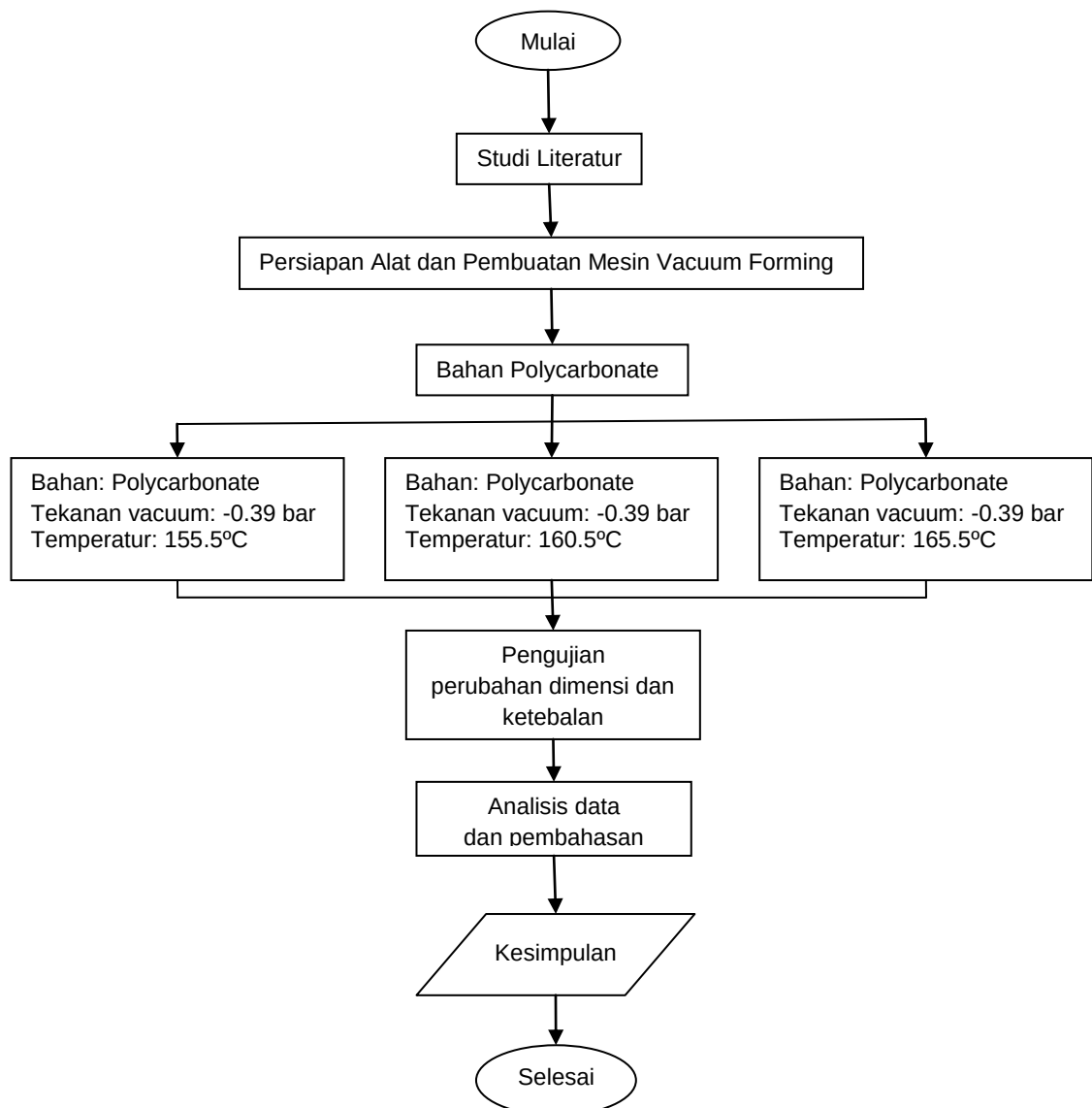
Ada beberapa parameter yang dapat di gunakan untuk menentukan kualitas hasil cetakan dari plastik pada proses *vacuum forming* diantaranya, jenis plastik dan ketebalan plastik yang digunakan, temperatur pemanasan dan tekanan *vacuum* yang digunakan. *Polycarbonate* merupakan salah satu jenis plastik yang mempunyai variasi ketebalan dan banyak tersedia dipasaran.

Polycarbonate telah digunakan secara luas karena mempunyai karakter seperti ringan, *fleksibel*, tahan benturan, transparansi tinggi dan tahan panas. Penggunaan *polycarbonate* antara lain untuk komponen elektronik, konstruksi, otomotif, komponen pelindung dan *aerospace* (Zhang dkk., 2019).

2. METODE

2.1 Diagram Alir

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan diagram alir:



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

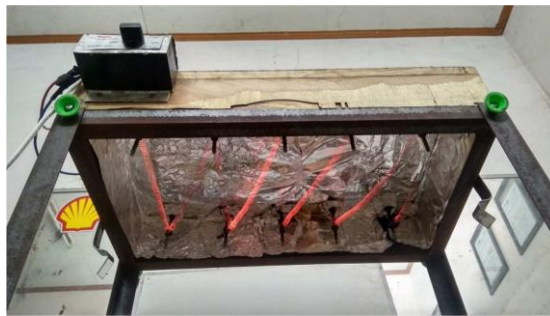
2.2.1 Peralatan Utama



Gambar 2 Alat *Vacuum Forming*

Pada penelitian ini, alat ini terbagi menjadi beberapa bagian di antaranya:

A. *Heater*



Gambar 3 *Heater*

Heater pada mesin ini digunakan untuk memanaskan plastik yang akan dibentuk sebelum dilakukan proses pencetakan. Kotak ini berukuran panjang 500 mm, lebar 300 mm, dan tinggi 100 mm. Didalam kotak ini terdapat 2 jalur elemen pemanas yang dirangkai *parallel* dengan daya 600 Watt 220 Volt yang digunakan sebagai *heater*

B. Penjepit Spesimen



Gambar 4 Penjepit Spesimen

Penjepit plastik pada mesin ini digunakan untuk menjepit plastik yang akan dibentuk ke *mold* atau cetakan.

C. Vacuum Chamber



Gambar 5 Vacuum Chamber

Vacuum chamber ini berukuran panjang 500 mm, lebar 300 mm, dan tinggi 100 mm. *Vacuum chamber* ini digunakan untuk menaruh cetakan atau *mold* yang akan dibentuk dan diletakkan dibagian atas. Dibagian atas *vacuum chamber* ini terdapat lubang-lubang yang berdiameter 4 mm dengan jarak 10 mm antara satu lubang dengan lubang yang lainnya. Fungsi lubang tersebut adalah sebagai jalannya udara yang akan dihisap dengan *vacuum cleaner*.

D. Vacuum Gauge



Gambar 6 Vacuum Gauge

Vacuum gauge ini berfungsi untuk mengukur tekanan hisap yang terjadi pada *vacuum chamber*.

E. Vacuum Cleaner



Gambar 7 Vacuum cleaner

Pada penelitian ini menggunakan tekanan 0,39 bar yang diperoleh dari mesin *vacuum cleaner*. *Vacuum cleaner* ini mempunyai spesifikasi berdaya 400 watt dengan tegangan 220 volt.

2.2.2 Peralatan pendukung

A. Penanda Material



Alat Tulis



Cutting Board



Penggaris Besi

Gambar 8 Alat Penanda Material

Alat penanda ini digunakan untuk mengukur dan memberi tanda pada material *polycarbonate* sebelum dipotong.

B. *InfraRed Thermometer*



Gambar 9 *InfraRed Thermometer*

InfraRed Thermometer dengan kemampuan membaca temperatur dari -50.0°C sampai 750°C / dari -58.0°F sampai 1382°F , berfungsi untuk membaca suhu yang dihasilkan oleh *heater* pada bahan yang akan dicetak.

C. Obeng



Gambar 10 Obeng

Obeng digunakan untuk membuka dan menutup pengunci material agar dapat mengunci *polycarbonate* dengan kuat.

D. Gunting Plat



Gambar 11 Gunting Plat

Gunting Plat digunakan untuk memotong *polycarbonate* agar sesuai dengan ukuran penjepit materialnya.

E. Sarung Tangan



Gambar 12 Sarung Tangan

Sarung tangan berguna melindungi tangan karena panas saat menurunkan lembaran *polycarbonate* yang telah dipanaskan menuju cetakan yang ada di *vacuum chamber*.

2.2.3 Alat Uji

A. Jangka Sorong



Gambar 13 Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi cetakan.

B. Meteran Kain



Gambar 14 Meteran Kain

Meteran kain yang bersifat fleksibel sehingga dapat mengikuti bentuk cetakan bentuk permukaan dan digunakan untuk mengukur garis-garis yang mengalami perubahan bentuk pada lembaran *polycarbonate*.

C. Mikrometer Sekrup

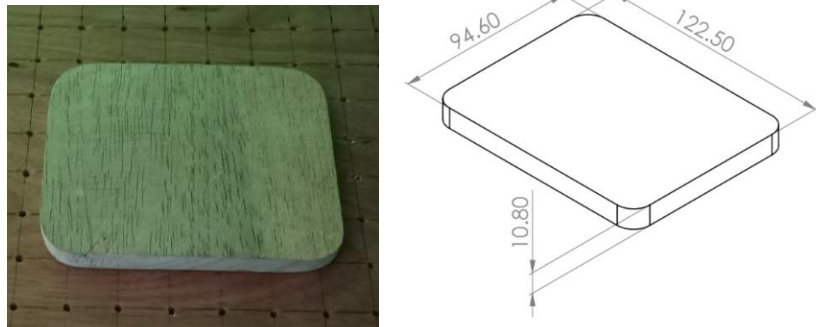


Gambar 15 Mikrometer Sekrup

Mikrometer sekrup digunakan untuk mengukur ketebalan lembaran *polycarbonate* yang telah mengalami pembentukan.

2.2.4 *Mold* (cetakan) Yang Digunakan

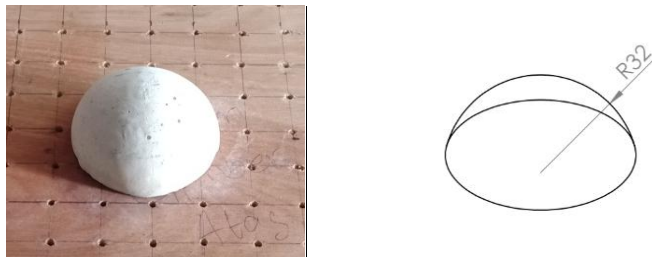
A. Cetakan Berbentuk Balok



Gambar 16 Cetakan Balok

Mold atau cetakan ini berukuran panjang 122,5 mm, lebar 94,6 mm, dan tinggi 10,8 mm. *Mold* ini sengaja dibuat seperti ini untuk mengetahui apakah plastik mampu terbentuk pada *mold* (cetakan) yang memiliki sudut-sudut yang tajam dan tinggi.

B. Cetakan Berbentuk Setengah Bola



Gambar 17 Cetakan $\frac{1}{2}$ Bola

Mold atau cetakan ini mempunyai jari-jari 32 mm. *Mold* ini sengaja dibuat seperti ini untuk mengetahui apakah plastik mampu terbentuk pada *mold* yang membulat seperti bola.

2.2.5 Bahan



Gambar 18 *Polycarbonate*

Bahan yang digunakan adalah *polycarbonate* dengan ketebalan 1,5 mm dengan dimensi panjang 500 mm dan lebar 300 mm. untuk ukuran gridnya 10 x 10 mm.

2.3 Cara Pengoperasian Alat

- A. Cetakan atau moulding yang digunakan harus terbuat dari bahan yang kuat dan tahan terhadap panas, hal itu bertujuan agar hasil cetakan tidak rusak ataupun ikut berubah bentuk ketika dilakukan penghisapan.
- B. Cetakan diletakkan pada *vacuum chamber* yang terdapat lubang atau ruang penghubung untuk *vacuum*.
- C. Pemanas pada alat *vacuum forming* dihidupkan dan plastik perlahan-lahan menjadi lembut dan lentur karena terkena panas.
- D. Plastik dipanaskan sampai suhu yang yang ditentukan tercapai.
- E. Pemanas dimatikan dan selanjutnya penjepit plastik tersebut ditarik ke bawah menuju cetakan/*mold* sampai *mold* tertutup material yang telah lentur karena terkena panas.
- F. *Vacuum cleaner* dihidupkan agar udara dibawah lembaran plastik menjadi hampa atau *vacuum*. Sehingga tekanan atmosfer di atas lembaran plastik mendorong kebawah pada cetakan karena tekanan diatas plastik lebih besar dibandingkan dibawah plastik. Pada tahap ini bentuk cetakan dapat terlihat jelas melalui lembaran plastik. Ketika suhu plastik turun ke suhu normal/ruangan dan

plastik sudah kembali ke tingkat kekerasan semula kemudian pompa *vacuum* dimatikan.

G. Plastik diangkat dari cetakan, sehingga hasil dari proses *vacuum forming* akan terlihat produknya.

2.4 Pengujian hasil cetakan

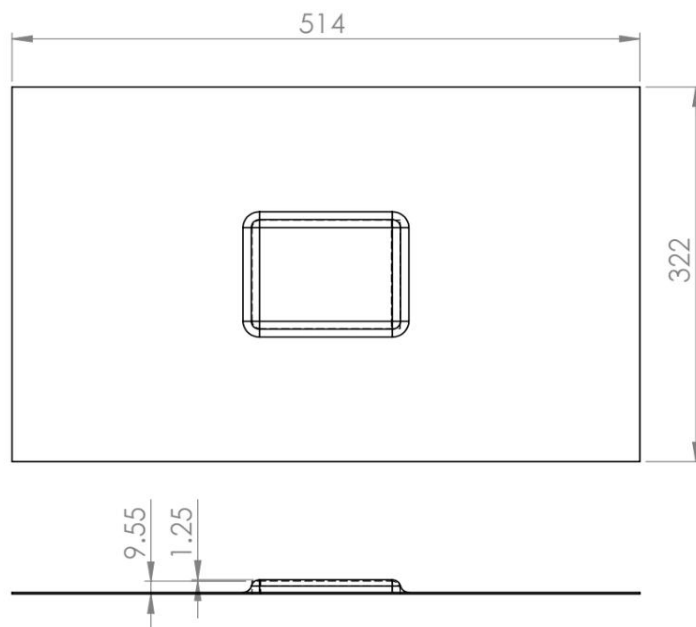
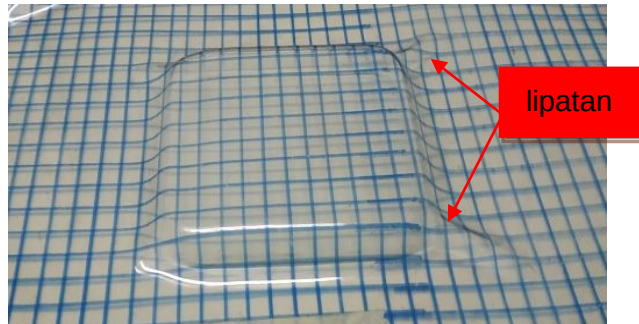
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan proses *vacuum forming*. *Mold*/cetakan yang digunakan terbuat dari kayu dengan bentuk persegi dan setengah bola. Panas yang diberikan disuplai dari *heater* dengan daya 600 watt sampai suhu yang sudah ditentukan dan untuk proses *vacuum* menggunakan *vacuum cleaner* dengan tekanan -0,39 bar. Tahapan pengujiannya adalah sebagai berikut.

- A. Menentukan jenis plastik yang akan digunakan yaitu *polycarbonate* berbentuk lembaran dengan ketebalan 1,5 mm.
- B. Menentukan ukuran lembaran plastik dengan ukuran 500 mm x 300 mm.
- C. Membuat *grid* dengan ukuran 10 mm x 10 mm pada permukaan plastik.
- D. Menentukan batas suhu pada 155°C, 160°C dan 165°C.
- E. Melakukan setting tekanan pada -0,39 Bar.
- F. Melakukan analisa hasil berdasarkan kualitas produk yang dihasilkan, seperti: bentuk *grid* yang mengalami *stretching* dan mengalami deformasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

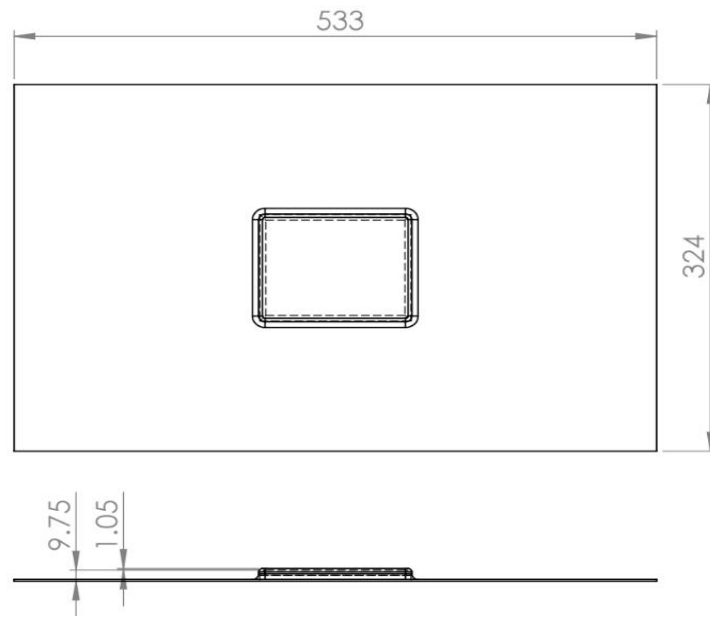
3.1 Bentuk dan Hasil Cetakan

A. Cetakan Balok

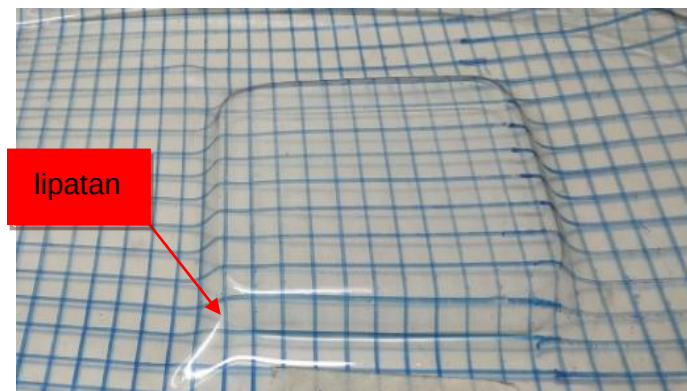


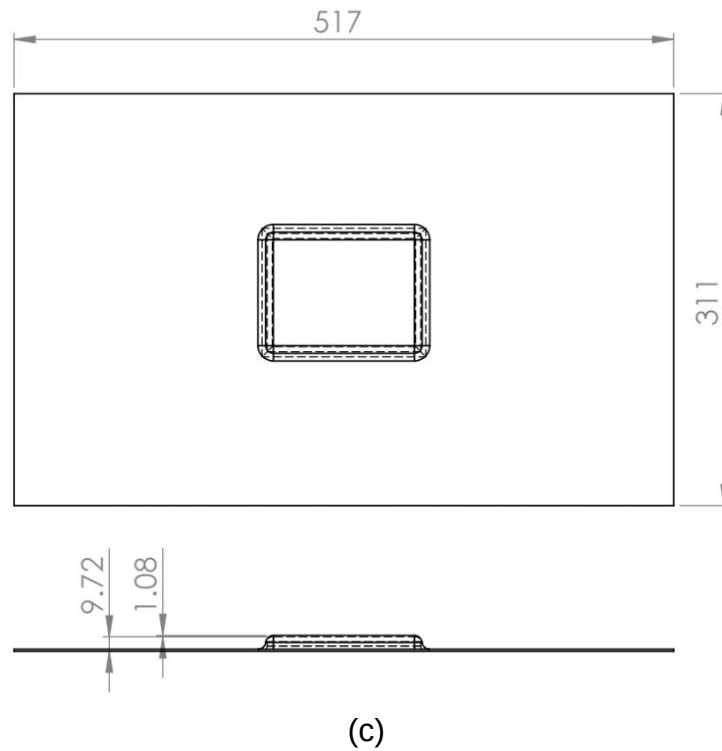
(a)





(b)

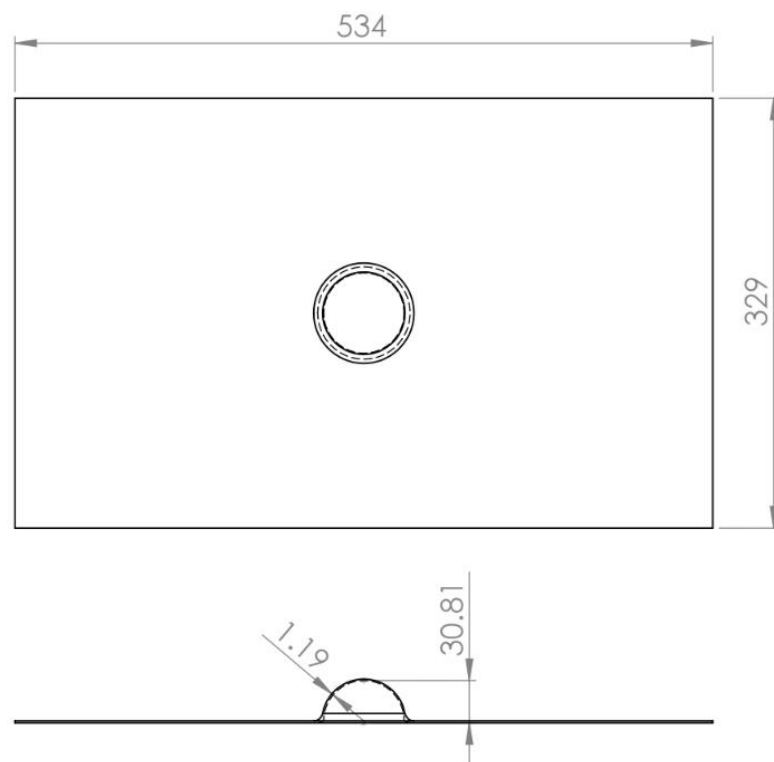
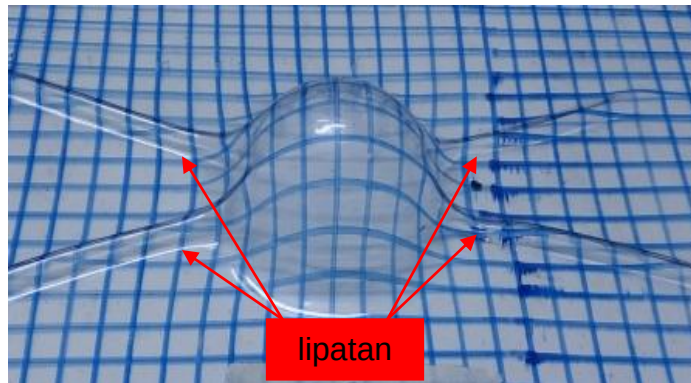




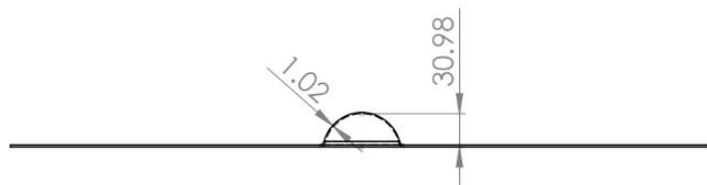
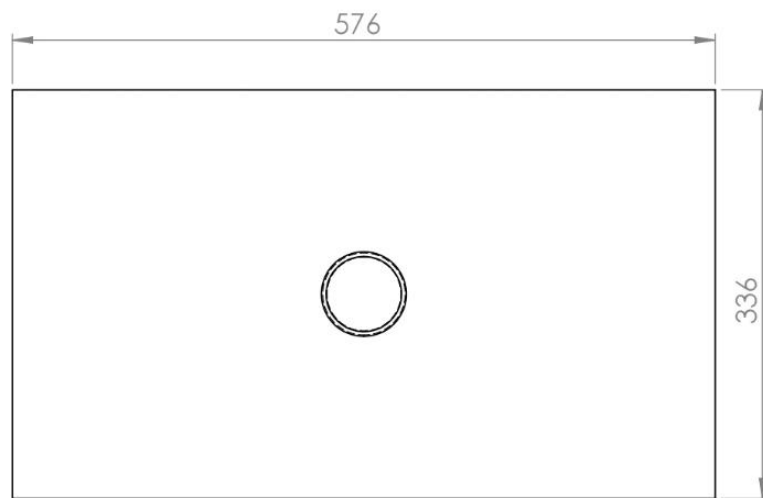
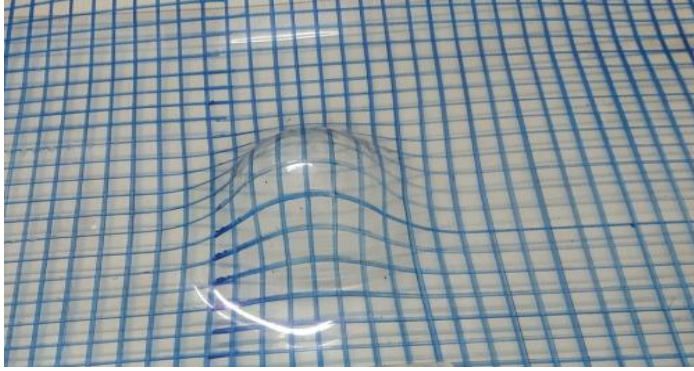
Gambar 19 Menunjukkan profil lembaran *polycarbonate* yang dipanaskan dengan 3 suhu, a. 155.5°C, b. 160.5°C, c. 165.5°C. Pada cetakan bentuk balok.

Berdasarkan pada gambar diatas lembaran *polycarbonate* yang sudah dipanaskan terdapat lipatan pada sudut cetakan. Hal tersebut disebabkan karena temperatur yang kurang tinggi, sehingga tidak bisa mengikuti lekukan cetakan. Bisa kita lihat pada gambar diatas pada temperatur 155.5°C terdapat dua lipatan pada sudut yang sudah ditunjukan pada anak panah, pada temperatur 160.5°C sudah mulai mengikuti bentuk cetakan, tetapi pada temperatur 165.5°C terdapat lipatan disebabkan karena temperatur terlalu tinggi sehingga membuat material meregang terlalu banyak dan kemampuan daya hisap yang kurang besar.

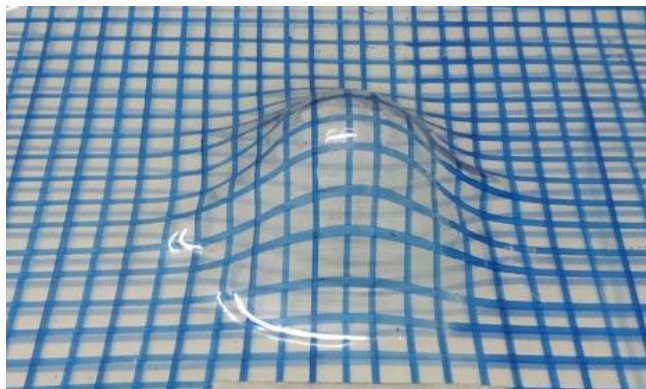
B. Cetakan ½ Bola

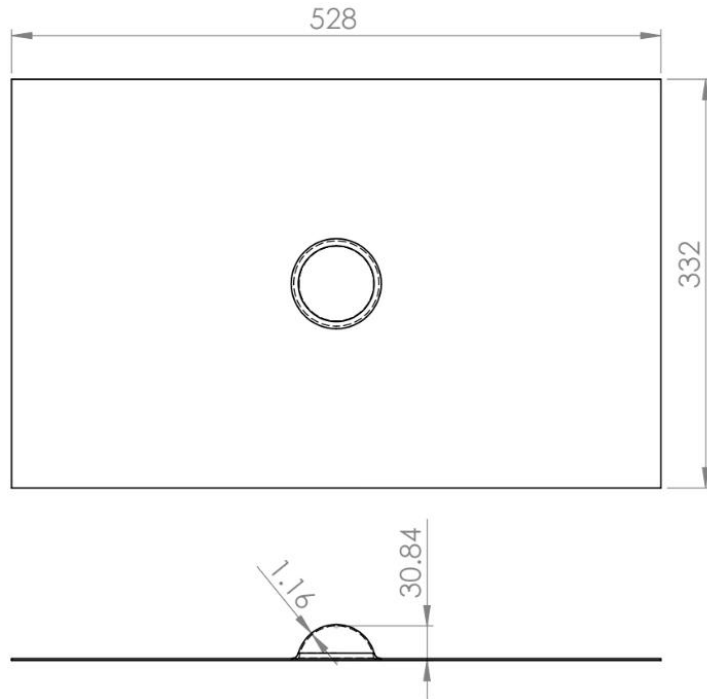


(a)



(b)





(c)

Gambar 20 Menunjukkan profil lembaran *polycarbonate* yang dipanaskan dengan 3 suhu, a. 155.5°C, b. 160.5°C, c. 165.5°C. Pada cetakan bentuk $\frac{1}{2}$ bola.

Berdasarkan gambar diatas hampir tidak ada perbedaan yang signifikan pada ketiga variasi temperatur tetapi lembaran *polycarbonate* yang dipanaskan belum bisa mengikuti bentuk atau geometri cetakan. Hanya saja pada variasi temperatur 155.5°C, temperatur kurang tinggi sehingga dapat kita lihat pada anak panah terdapat lipatan atau bisa disebut kecacatan. Pada variasi temperatur 160.5°C dan 165.5°C diatas hampir tidak ada perbedaan yang signifikan. Walaupun secara fisik terlihat sama namun saat di sentuh permukaan plastik *polycarbonate* pada variasi temperatur 160.5°C lebih halus dibanding dengan variasi temperatur 165.5°C yang bagian tepi cetakan sedikit bergelombang.

3.2 Dimensi

A. Cetakan Balok

Tabel 1 Hasil pengukuran panjang dan lebar lembaran *polycarbonate* pada cetakan balok.

Variasi (°C)	Dimensi Awal (mm)		Dimensi Akhir (mm)		Δ Dimensi (mm)		Persentase Perubahan Dimensi (%)	
	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar
155.5	500	300	514	322	14	22	2,8	7,4
160.5	500	300	533	324	33	24	6,6	8,2
165.5	500	300	517	311	17	11	3,5	3,8

Data pada tabel hasil pengukuran dan perhitungan di atas di ambil dari garis-garis yang berubah bentuk mengikuti bentuk cetakan. Dapat di lihat bahwa variasi temperatur 160.5°C memiliki garis yang lebih panjang dari pada variasi temperatur 155.5°C dan 165.5°C, begitu juga dengan presentase perubahan dimensinya. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 160.5°C lembaran *polycarbonate* lebih mampu mengikuti bentuk dari permukaan cetakan, dikarenakan ketika tekanan vakum menghisap udara yang berada antara cetakan dan lembaran *polycarbonate* menjadi lebih hampa udara.

B. Cetakan ½ Bola

Tabel 2 Hasil pengukuran panjang dan lebar lembaran *polycarbonate* pada cetakan ½ bola.

Variasi (°C)	Dimensi Awal (mm)		Dimensi Akhir (mm)		Δ Dimensi (mm)		Persentase Perubahan Dimensi (%)	
	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar	Panjang	Lebar
155.5	500	300	534	329	34	29	6,8	9,6
160.5	500	300	576	336	76	36	15,2	12
165.5	500	300	528	332	28	32	5,6	10,6

Data pada tabel hasil pengukuran dan perhitungan tersebut di ambil dari garis terdekat dititik tengah hasil cetakan. Dapat di lihat bahwa variasi

temperatur 160.5°C memiliki garis yang lebih panjang dari pada variasi temperatur 155.5°C dan 165.5°C, begitu juga dengan presentase perubahan dimensinya. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 160.5°C lembaran *polycarbonate* lebih mampu mengikuti bentuk dari permukaan cetakan, dikarenakan ketika tekanan vakum menghisap udara yang berada antara cetakan dan lembaran *polycarbonate* menjadi lebih hampa udara.

3.3 Ketebalan

A. Cetakan Balok

Tabel 3 Hasil pengukuran ketebalan lembaran *polycarbonate* pada cetakan balok.

Variasi (°C)	Dimensi Awal (mm)	Dimensi Akhir (mm)	Δ Dimensi (mm)	Persentase Pengurangan Ketebalan (%)
155.5	1,5	1,25	0,25	16.6
160.5	1,5	1,05	0,45	30
165.5	1,5	1,08	0,42	28

Pada pengukuran ketebalan didaerah yang mengalami perubahan bentuk, diukur secara acak pada titik-titik perpotongan garis. Pada data tabel diatas menunjukan perubahan ketebalan yang terjadi akibat perubahan bentuk lembar *polycarbonate*, untuk variasi temperatur 160.5°C mempunyai tingkat ketebalan yang lebih tipis dari pada temperatur 155.5°C dan temperatur 165.5°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 160.5°C lembaran *polycarbonate* mengalami peregangan yang besar sehingga pada saat lembaran *polycarbonate* yang sudah melunak akan lebih mudah terhisap dengan lebih kuat menuju cetakan dan menjadikan lembaran *polycarbonate* tersebut menjadi lebih tipis.

B. Cetakan $\frac{1}{2}$ Bola

Tabel 4 Hasil pengukuran ketebalan lembaran polycarbonate pada cetakan $\frac{1}{2}$ bola.

Variasi (°C)	Dimensi Awal (mm)	Dimensi Akhir (mm)	Δ Dimensi (mm)	Persentase Pengurangan Ketebalan (%)
155.5	1,5	1,19	0,31	20,6
160.5	1,5	1,02	0,48	32
165.5	1,5	1,16	0,34	22,6

Pada pengukuran ketebalan untuk cetakan $\frac{1}{2}$ bola memperoleh hasil yang cukup mengejutkan dengan presentase pengurangan ketebalan lebih dari 20%. Hal ini diakibatkan karena cetakan yang lebih tinggi dengan sudut kemiringan yang lebih landai membuat aliran udara yang berada di celah antara cetakan dan lembaran polycarbonate menjadi lebih mudah terhisap oleh *vacuum cleaner*. Karena hal inilah terjadi pengurangan ketebalan hingga lebih dari 20%. Walaupun begitu, pada variasi temperatur 160.5°C lembaran *polycarbonate* lebih tipis dari pada temperatur 155.5°C dan temperatur 165.5°C.

3.4 Hasil Pengukuran Suhu



Gambar 21 Titik pengukuran suhu pada bahan *polycarbonate*

Untuk mengetahui suhu yang diinginkan maka kita gunakan alat *infrared thermometer*, dengan cara mengarahkan didaerah titik yang dapat kita lihat pada gambar 21.

Tabel 5 Hasil pengukuran suhu

Variasi (°C)	Ce			Rata-rata (°C)	Ceta			Rata-rata (°C)
	Titik 1 (°C)	Titik 2 (°C)	Titik 3 (°C)		Titik 1 (°C)	Titik 2 (°C)	Titik 3 (°C)	
155	155.8	155.4	155.5	155.5	155.6	155.4	155.5	155.5
160	160.7	160.5	160.5	160.5	160.7	160.5	160.4	160.5
165	165.4	165.7	165.5	165.5	165.7	165.4	165.6	165.5

Data diambil dari indikator pada *infrared thermometer* yang diarahkan pada bahan *polycarbonate*, untuk mengetahui suhu yang lebih akurat maka kita menggunakan tiga bagian atau titik agar mengetahui suhu pada bahan polycarbonate sudah mencapai yang kita inginkan. Walaupun ketiga bagian atau titik tersebut memiliki suhu yang berbeda, namun dapat diambil rata-rata yang sama 155.5°C, 160.5°C, dan 165.5°C.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

1. Temperatur sangat mempengaruhi mampu bentuk material pada proses pembentukan dengan *vacuum forming*. Hal ini terbukti pada presentase perubahan dimensi dan presentase pengurangan ketebalan yang menunjukkan bahwa variasi temperatur 160.5°C lebih optimal membentuk bahan *polycarbonate* dibanding 155.5°C, dan 165.5°C. Sehingga semakin tinggi temperatur tidak menunjukkan bentuk yang lebih optimal.
2. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pembentukan material *polycarbonate* dengan metode *vacuum forming* menggunakan tekanan hisap tetap sebesar -0,39 bar, temperatur optimal

yang diperoleh adalah 160.5°C. Pada temperatur 155.5°C material sukar dibentuk karena tekstur masih keras dan mendekati *glass transition temperatur*, sedangkan pada temperatur 165.5°C material sukar dibentuk karena terlalu lunak dan mendekati *melting temperature*.

4.2 Saran

1. Perlu diadakan penelitian lanjutan mengenai mesin *vacuum forming*, seperti menggunakan mesin vakum yang mempunyai daya hisap yang lebih besar, dan mengembangkan desain mesin lebih optimal.
2. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut dengan beberapa variabel secara bersamaan. Seperti melakukan penelitian menggunakan variasi tekanan vakum, ketebalan material, dan temperatur agar mengetahui lebih detail proses pembentukan pada *vacuum forming*.

Daftar Pustaka

- Chang, Y., dkk. 2012. “*Numerical and experimental investigation of polycarbonate vacuum-forming process*”. China: National Taiwan University.
- Dwipayana, Candra C. 2020. “*Design dan Pembuatan Prototype Mesin Vacuum Forming*”. Bandung: Universitas Pasundan Bandung.
- K. Abdul Ghani, dkk. 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: Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang.
- Klein, Peter W. 2009. “*Fundamentals of Plastics Thermoforming*”. America: Ohio University.
- Permana, Cepi P. 2018. “*Pembuatan Mesin Thermoforming Manual Metode Vacuum untuk Bahan Polymethyl Methacrylate (PMMA)*”. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Junior, William D. C, dkk. 9 Edition. “*Materials Science and Engineering*”. USA: Aptara, Inc.

Zhang W, dkk. 2019. *“Esxperiment and Modeling for Aeronautical and Aerospace Applications”*. Series Editor Piotr Breittkopf. UK: ISTE Press Ltd, London.