

ANALISIS KINERJA PENGENDALI TEMPERATUR ALAT AIR BLOWING HEATER PADA PROSES THERMOFORMING MATERIAL UHMW P1000

Andre Pawa Kristian Depari¹, Susilo Adi Widyanto², Paryanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: andrekristian17@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada analisis kinerja pengendali temperatur alat *Air Blowing Heater* dalam proses *thermoforming* material *Ultra High Molecular Weight (UHMW) P1000*. Tujuan utama penelitian adalah menguji efisiensi dan efektivitas sistem kendali dengan *Temperature Controller Omron E5CC* untuk mempertahankan kualitas produk selama *thermoforming*. *Air Blowing Heater* digunakan untuk memanaskan lembaran *UHMW P1000* pada suhu optimal sehingga pembentukan material dalam cetakan bisa terjadi dengan tepat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kontrol *PID (Proportional Integral Derivative)* pada *Air Blowing Heater* dapat meningkatkan stabilitas suhu dan homogenitas pemanasan material *UHMW P1000*. Implementasi kontrol *PID* terbukti lebih efektif dibandingkan metode kontrol konvensional, memberikan peningkatan efisiensi energi dan kualitas produk akhir. Dengan demikian, pengendalian suhu yang efisien dan presisi tinggi menggunakan kontrol *PID* sangat direkomendasikan untuk aplikasi industri dalam proses *thermoforming UHMW P1000*.

Kata kunci: proses manufaktur; *sheet heating*; sistem kendali suhu; *temperature controller*; *uhmw p1000*

Abstract

This research focuses on the performance analysis of a temperature controller in an Air Blowing Heater used in the thermoforming process of Ultra High Molecular Weight (UHMW) P1000 material. The main objective of the study is to test the efficiency and effectiveness of the temperature control system in maintaining product quality during thermoforming. The Air Blowing Heater is used to heat UHMW P1000 sheets to an optimal temperature, ensuring proper material formation in the mold. The research findings show that the use of PID (Proportional-Integral-Derivative) control in the Air Blowing Heater can enhance temperature stability and heating homogeneity of UHMW P1000 material. The implementation of PID control proves to be more effective than conventional control methods, resulting in increased energy efficiency and improved final product quality. Therefore, efficient and precise temperature control using PID is highly recommended for industrial applications in the thermoforming process of UHMW P1000.

Keywords: manufacturing process; *sheet heating*; *temperature control system*; *temperature controller*; *uhmw p1000*

1. Pendahuluan

UHMW (Ultra High Molecular Weight) adalah polimer polietilen linier dengan nilai berat molekul sangat tinggi. Berat molekul tipikalnya berjumlah kisaran 4×10^6 g/mol, dengan urutan besar yang melebihi besar polimer polietilen jenis yang lain. Sifat *UHMW* yang merupakan jenis polimer yang memiliki sifat ketahanan yang kuat terhadap abrasi, permukaan licin dan sifat fisik yang kuat menjadikannya sangat banyak digunakan dalam dunia industri. [1], [2]

Dalam pengolahan termoplastik untuk menjadi barang tepat guna dibutuhkan rangkaian proses manufaktur untuk mendapatkan hasil produk tertentu yang disebut *thermoforming*. Proses *thermoforming* material termoplastik melalui beberapa tahapan yaitu *sheet heating*, *forming process*, dan *cooling/trimming*. Sistem pemanasan ini memerlukan elemen pemanas sebagai piranti yang mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui proses *thermoforming*. [3]

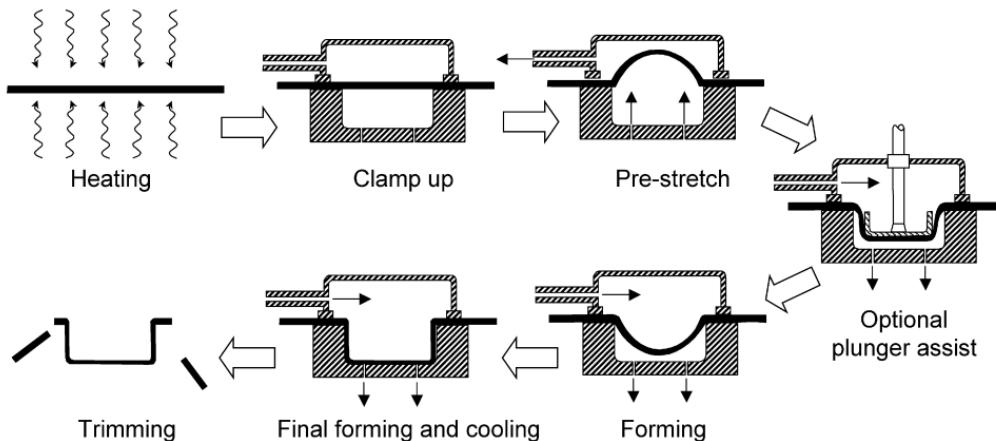
Dalam proses *thermoforming*, operasi pemanasan merupakan salah satu langkah yang memakan waktu lebih lama dan mungkin menimbulkan kesulitan terbesar, perlunya pemanfaatan sumber daya manusia dan perencanaan alat pemanasan yang tepat. Pemrosesan lembaran polimer di atas transisi kaca membuat proses *thermoforming* sensitif terhadap suhu. Distribusi suhu lembaran mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap perilaku mekanis lembaran

selama proses transformasi menjadi produk akhir. Ini mengatur karakteristik estetika produk yang dibentuk, serta fungsinya. [4]

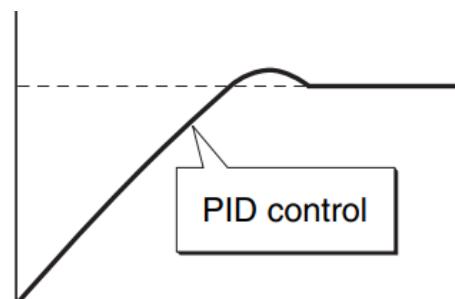
Proses pemanasan lembaran termoplastik sedikit di atas suhu transisi gelas, untuk polimer amorf, atau sedikit di bawah titik leleh. Untuk mendistribusikan panas hingga titik akhir, bagian dikontrol secara drastis oleh distribusi suhu awal di dalam lembaran, maka sangat penting untuk mengoptimalkan tahap pemanasan. [5]

Dalam mendukung proses pemanasan secara optimal dibutuhkan suatu sistem kendali yang optimal. Sistem kendali sebagai suatu alat untuk mengendalikan, mengarahkan, dan mengatur suatu sistem. [6] Komponen sistem kendali terdiri dari tiga bagian utama yang memungkinkan sistem bekerja dengan baik: sistem sensor, sistem pengendali, dan sistem penggerak. [7]

Salah satu yang diperlukan yaitu merancang komponen pemanas dengan menggunakan komponen *temperatur controller*. Pada penelitian ini dilakukan pengujian sistem kontrol proses *sheet heating* dengan memvariasikan parameter yang dikontrol oleh *temperature controller* dengan tipe kontrol *PID*. Parameter ini dapat diberi nilai, atau disesuaikan, untuk menyesuaikan pengaruhnya terhadap proses. Jauh lebih praktis daripada pengontrol on/off pada umumnya, pengontrol *PID* memungkinkan penyesuaian yang lebih baik pada sistem. [8][9]



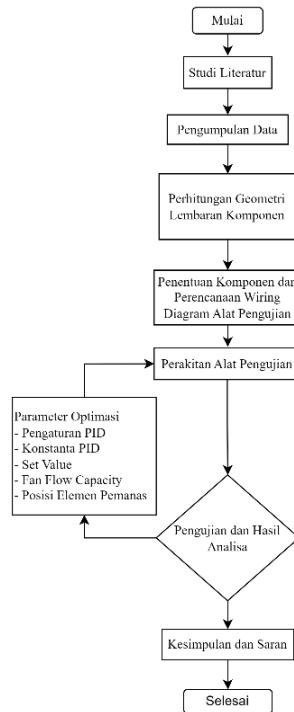
Gambar 1. Diagram Proses Thermoforming [10]



Gambar 2. Karakteristik Aksi Kontrol PID [11]

2. Bahan dan Metode Penelitian

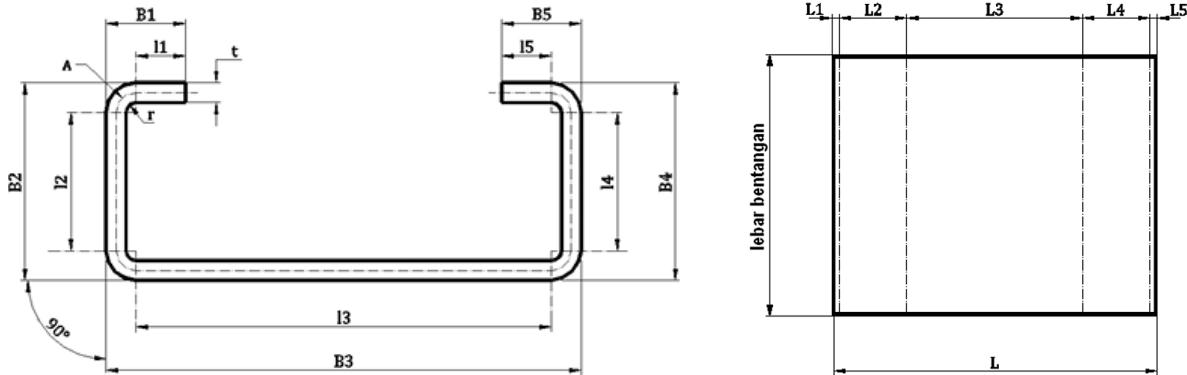
Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini berfokus pada analisis kinerja *Temperature Controller Omron E5CC* untuk dapat mengendalikan suhu proses pemanasan alat *Air Blowing Heater*. Penelitian ini dimulai dari studi literatur serta penyesuaian dengan titik pemanasan untuk tiap komponen *Insulator Protector Mounting Tools (IPMT)* serta dilanjutkan untuk perakitan dan pengujian mekanisme pemanasan. Berikut diagram alir yang disajikan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

2.1 Perhitungan Titik Pemanasan

Pada pengujian ini dilakukan perhitungan titik pemanasan dari tiap komponen, perhitungan ini berguna untuk menentukan panjang bentangan lembaran *UHMW P1000*, titik pemanasan dan luas pemanasan tiap komponen *IPMT*. Geometri ini dipakai sebagai pemasangan lembaran pada meja *Air Blowing Heater*.



Gambar 4. Teori Bentangan [12]

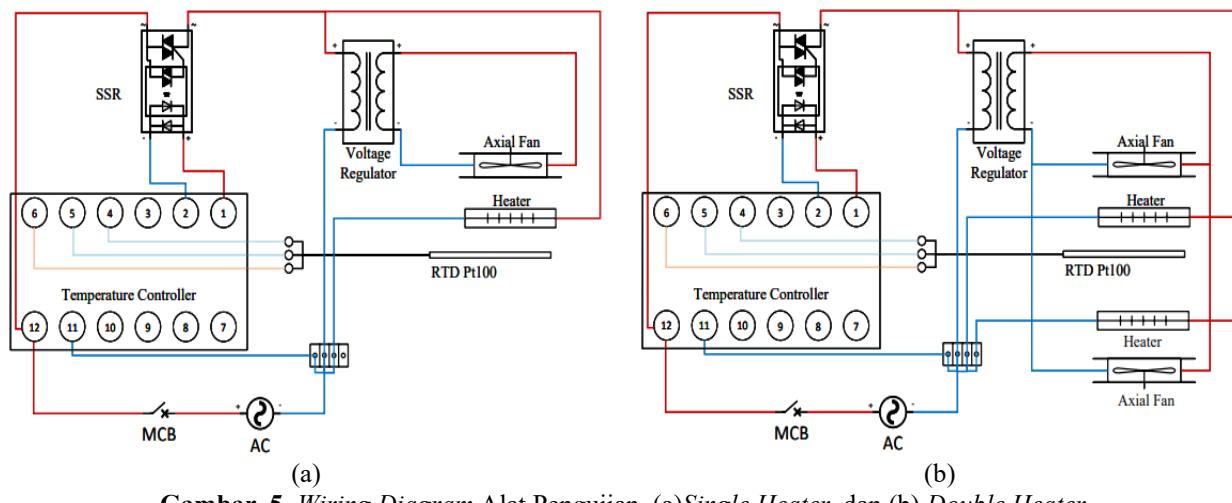
$$\begin{aligned} L &= l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + 4A \\ L &= L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} l_1 &= B_1 - (r + t) & l_5 &= B_5 - (r + t) \\ l_2 &= B_2 - (r + t) - (r + t) = B_2 - 2(r + t) & l_3 &= B_3 - (r + t) - (r + t) = B_3 - 2(r + t) \\ l_4 &= B_4 - (r + t) - (r + t) = B_4 - 2(r + t) & A &= \frac{2\pi\alpha(r+x)}{360^\circ} \end{aligned}$$

2.2 Perancangan Alat Pengujian

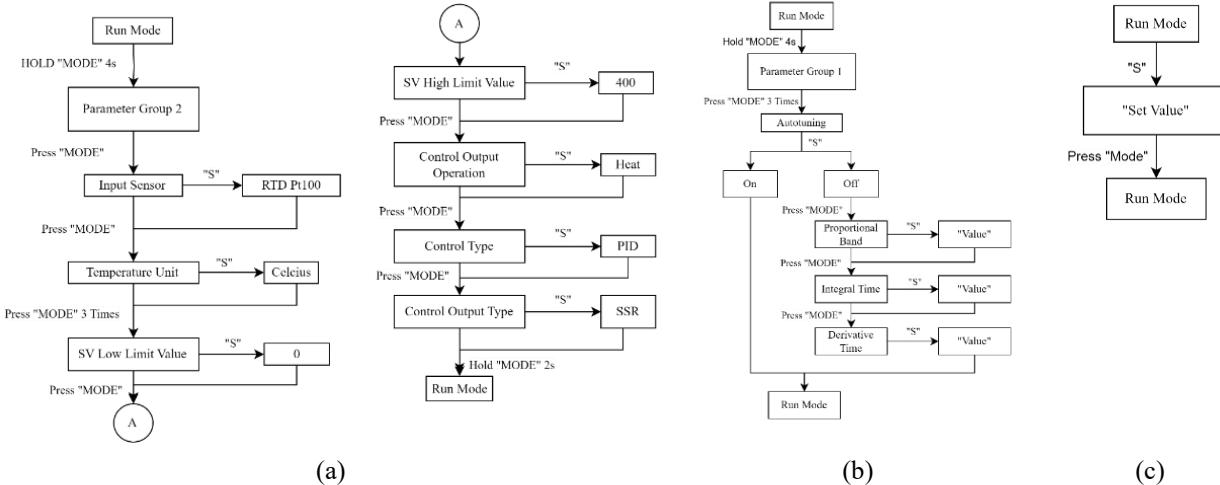
Pada penelitian ini dilakukan perancangan alat pengujian, dimana nantinya alat pengujian ini sebagai panduan untuk nantinya dikembangkan pada alat *Air Blowing Heater* untuk penggunaan industri. Proses perancangan alat pengujian ini, dimulai dengan merencanakan wiring diagram alat pengujian.



Gambar 5. Wiring Diagram Alat Pengujian, (a)Single Heater, dan (b) Double Heater

Wiring diagram ini nantinya dipakai sebagai dasar perakitan alat pengujian dimana hal ini didasarkan bahwa setiap rangkaian listrik tentunya memerlukan pengkoneksian antar komponen yang baik dan aman. Oleh sebab itu proses perakitan alat pemanas juga harus menggunakan alat pendukung diantaranya sebagai berikut obeng, tang potong, solder, tang crimping, insulator listrik, mini torch, dan kunci pas.

Setelah alat pengujian dirakit, dilakukan proses pengaturan agar *temperature control* dapat membaca komponen serta tujuan perlakuan yang ingin dilakukan. Pada proses ini dilakukan setting Parameter 2, Parameter 1 serta *set value* pemanasan. Pengaturan *temperature controller* dibagi menjadi 3 tahapan yang dijelaskan pada 3 diagram alir.



Gambar 6. Setting Parameter Temperature Controller, (a) Parameter 2, (b) Parameter 1, dan (c) Set Value

2.3 Pengambilan Data Fan Air Flow Capacity

Pada pengambilan data kecepatan angin menggunakan *Anemometer LM800*. Pengujian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

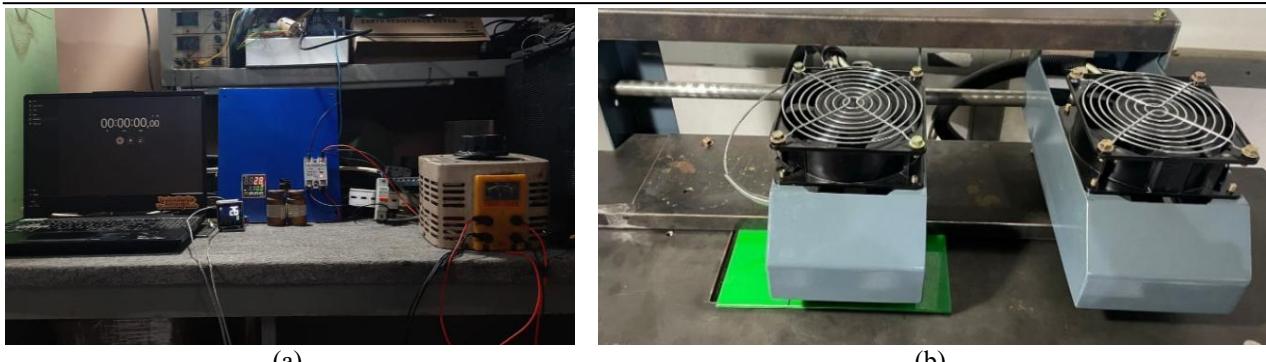
1. Melakukan pengaturan tegangan pada voltage regulator sesuai variasi tegangan 80 – 240 volt
2. Melakukan setting satuan pada *Anemometer* dengan menggunakan satuan m/s
3. Setelah dilakukan pengaturan, maka pengujian dilakukan dengan menempatkan *anemometer* sejajar dengan hembusan angin kipas.
4. Setelah bacaan pada anemometer stabil, maka untuk melock bacaan ditekan tombol *Hold* pada *Anemometer*
5. Pembacaan dicatat pada tiap variasi sebanyak dua kali percobaan.

Setelah nilai data kecepatan diketahui, maka dilakukan perhitungan luas dari *axial fan* yang dipakai (A) untuk mencari *air flow capacity* (Q) dengan persamaan berikut:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Av\Delta t}{\Delta t} = Av$$

2.4 Pengambilan Data Kinerja Pemanas

Pengambilan data pada pengujian ini berfokus pada variasi dari nilai tegangan kipas, set value, sistem kontrol PID dengan memperhatikan fluktuasi suhu serta temperatur lembaran *UHMW P1000* pada kondisi pemanasan. Dalam mendukung pengambilan data, perlu dilakukan setup alat dan bahan dalam pengujian.



Gambar 7. Setup Pengujian, (a) Pemosisian Komponen Pengambilan Data, (b) Posisi Pemanas

Pengujian pada penelitian ini difokuskan dalam pengaturan sistem kontrol alat pemanas. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan pengaturan pada mode *PID* dengan menggunakan *Temperature Controller Omron E5CC*. Dalam pengujian pada penelitian ini dilakukan pengambilan data dalam tahapan sebagai berikut:

1. Mendata nilai suhu pada *temperatur control*, *temperatur monitor*, suhu awal lembaran *UHMW*, dan suhu awal *finned heater*.
 2. Setelah mendata suhu awal, dilakukan pengaturan pada setting temperature control, tegangan fan dan nilai *set value*. Pada setiap pengujian memiliki variable yang berbeda tiap pengujinya. Variabel yang berbeda antar pengujian adalah mode temperatur control, variasi nilai tegangan, variasi nilai P, I, D yang berbeda.
 3. Pada penelitian ini, setiap pengujian yang dilakukan berdasarkan dari hasil analisis dari setiap masing-masing pengujian
 4. Pengujian ini dilakukan dengan mencatat data suhu pada masing-masing kondisi seperti kondisi awal, kondisi saat mencapai *set value*, dan memantau suhu pada sistem pemanasan
 5. Dalam setiap pengujian data yang diambil berdasarkan nilai suhu dalam *temperatur control*, *temperatur monitor*, dan data suhu pada lembaran *UHMW* dengan menggunakan thermogun.
 6. Dalam memantau pencatatan data, dibantu dengan menggunakan alat luaran diantaranya *timer*, *camera*, dan *infrared thermal imager*. *Timer* digunakan untuk mencatat waktu dari tiap nilai suhu yang diambil. *Camera* digunakan untuk merekam nilai fluktuasi nilai suhu dari *temperatur control* dan *temperatur monitor*. *Camera* digunakan untuk memastikan kembali setiap pencatatan suhu. *Infrared thermal imager* digunakan sebagai alat untuk memantau nilai suhu pada lembaran *UHMW* dari bagian atas dan bagian bawah serta nilai suhu dari *finned heater*.
 7. Setelah semua setting telah benar, maka dilakukan pengujian hingga mencapai data yang dibutuhkan.
 8. Setelah pengujian selesai, dilakukan pencatatan data hasil dari setiap pengujian dengan cara memantau kembali hasil rekaman yang telah diambil. Setiap data yang dipantau dicatat dalam *Data Worksheet Pengujian*
- Setelah mencatat data, dilakukan analisis dari setiap data proses untuk mendapatkan hasil dalam grafik proses pengujian.

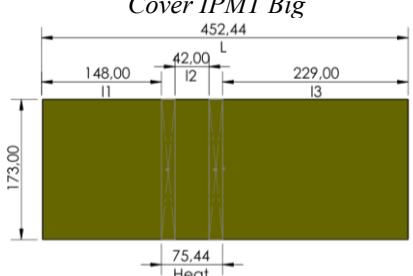
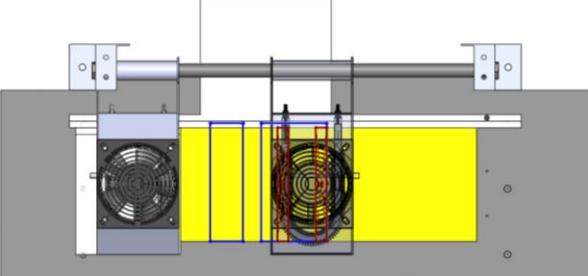
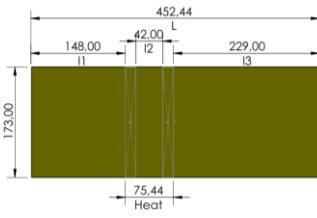
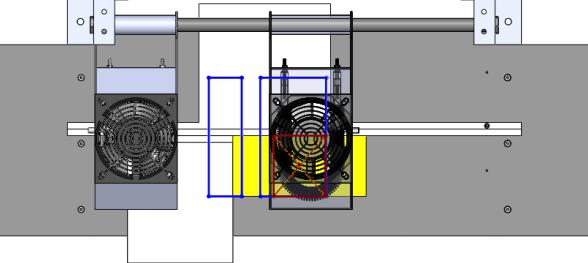
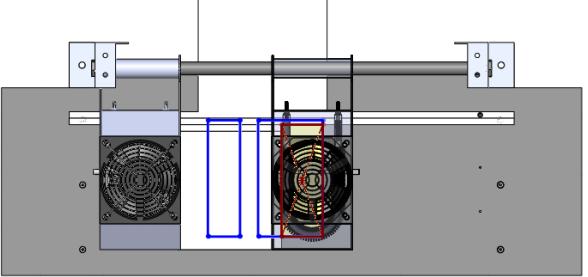
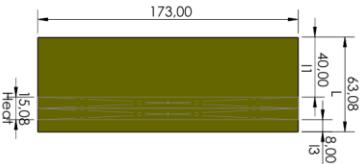
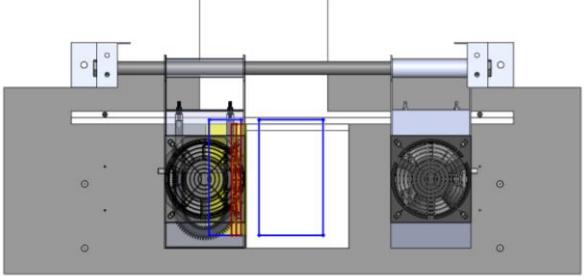
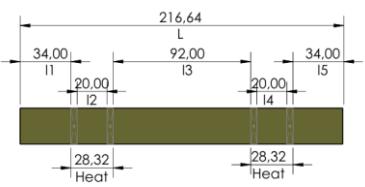
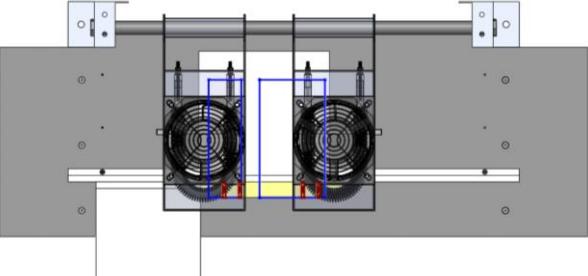
3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian didapatkan hasil yang nantinya dapat dipakai sebagai acuan untuk melakukan proses thermoforming menggunakan *Temperature Controller Omron E5CC* dengan kontrol proses skema *PID*. Serta titik pemanasan sebagai dasar pemosisian lembaran agar dapat membentuk posisi tekukan yang diinginkan.

3.1 Hasil Perhitungan Geometri Lembaran

Pada penelitian bertujuan untuk membentuk lembaran *UHMW* menjadi 5 komponen pembentuk *Insulation Protector Mounting Tools* yang memiliki titik pembengkokan berbeda-beda. Data ukuran dan bentuk komponen merupakan data drawing 5 komponen yaitu *Cover IPMT Big*, *Cover IPMT Small*, *Handle*, *Kait Atas*, dan *Kait Bawah*.

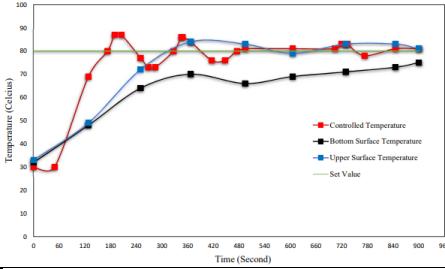
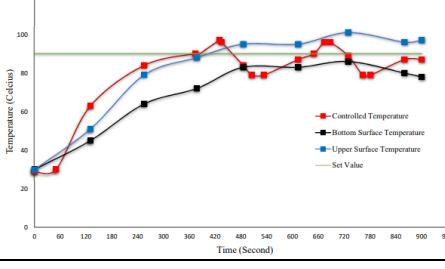
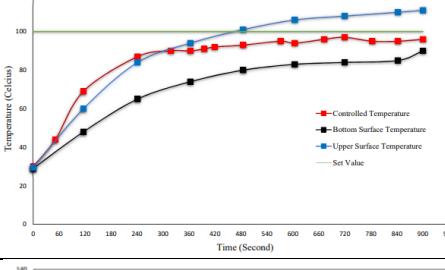
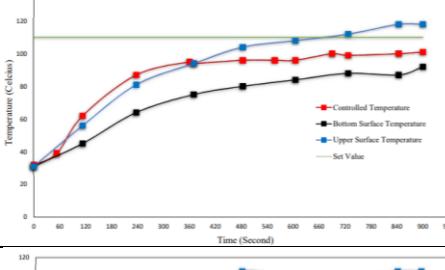
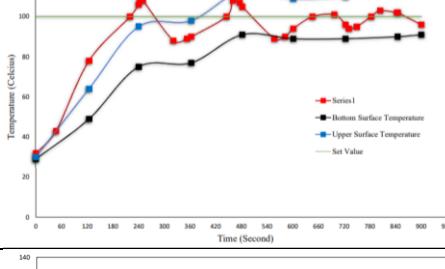
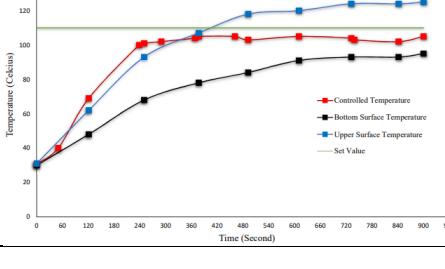
Tabel 1. Geometri Lembaran dan Posisi Pemanasan Lembaran IPMT

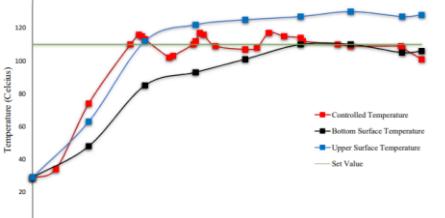
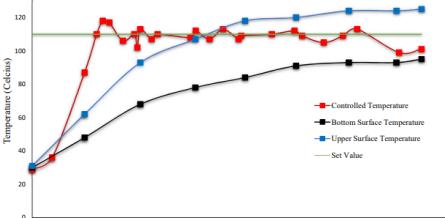
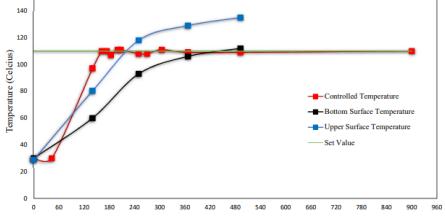
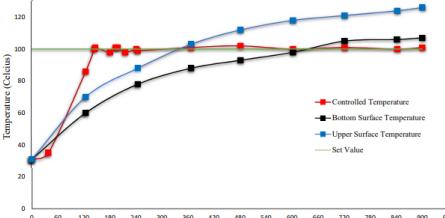
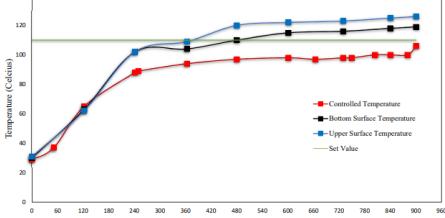
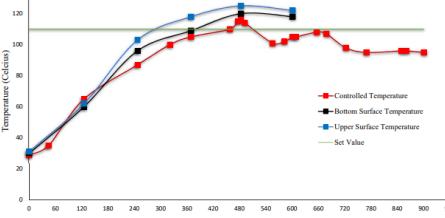
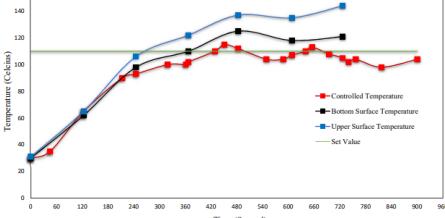
Geometri Lembaran Komponen IPMT	Posisi Pemanasan Lembaran Komponen
<p><i>Cover IPMT Big</i></p> 	
<p><i>Cover IPMT Small</i></p> 	
<p><i>Kait Atas</i></p> 	
<p><i>Kait Bawah</i></p> 	
<p><i>Handle</i></p> 	

3.2 Hasil Pengujian Alat Pemanas

Pada penelitian ini berfokus pada pengujian *Air Blowing Heater* menggunakan skema sistem kendali *PID*. Alat ini menggunakan *Temperature Controller Omron E5CC* sebagai komponen yang mengontrol proses pemanasan. Alat ini dirakit di Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Diponegoro.

Tabel 2. Hasil Grafik Pengujian Pemanas

Parameter Pengujian	Grafik Pengujian (Temperatur – Waktu)	Analisis Pengujian
Pengujian 1 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 80 °C Flow Capacity 0,055 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 15$, $I = 101$, $D = 17$) Pemanasan cukup stabil namun lembaran belum mencapai suhu yang mencukupi untuk forming
Pengujian 2 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 90 °C Flow Capacity 0,055 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 21,3$, $I = 149$, $D = 25$) Pemanasan cukup stabil namun lembaran belum mencapai suhu yang mencukupi untuk forming
Pengujian 3 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 100 °C, Flow Capacity 0,055 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini tidak didapatkan hasil nilai konstanta PID karena tidak mencapai titik set value. Mungkin flow capacity dari Fan yang terlalu besar, namun lembaran sudah mencapai suhu forming
Pengujian 4 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,055 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini tidak didapatkan hasil nilai konstanta PID karena tidak mencapai titik set value. Mungkin flow capacity dari Fan yang terlalu besar, namun lembaran sudah mencapai suhu forming.
Pengujian 5 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 100 °C Flow Capacity 0,053 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 24,7$, $I = 143$, $D = 24$) Dapat terlihat pada proses ini masih terdapat overshooting dan osilasi yang signifikan
Pengujian 6 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,053 m ³ /s Mode Autotuning PID		Pada pengujian ini tidak didapatkan hasil nilai konstanta PID karena tidak mencapai titik set value. Mungkin flow capacity dari Fan yang terlalu besar, namun lembaran sudah mencapai suhu forming.

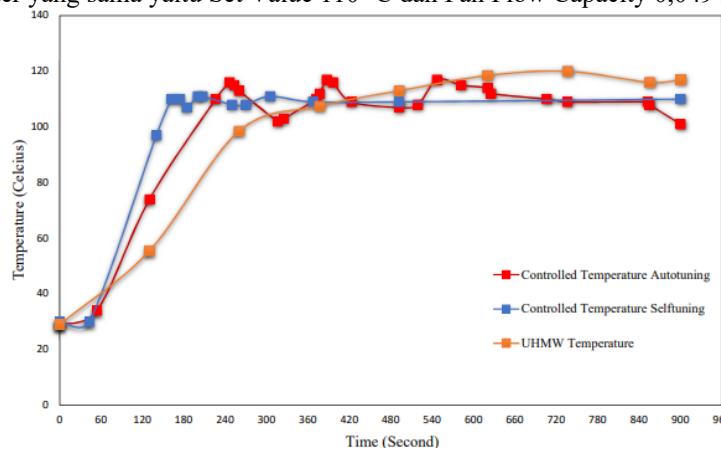
<p>Pengujian 7 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,049 m³/s Mode Autotuning PID</p>		<p>Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 24,7, I = 143, D = 24$) Dapat terlihat pada proses ini masih terdapat undershooting dan settling time yang cukup panjang</p>
<p>Pengujian 8 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,043 m³/s Mode Autotuning PID</p>		<p>Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 8, I = 42, D = 7$) Dapat terlihat pada proses ini cukup cepat mencapai set value dengan overshoot yang relative kecil</p>
<p>Pengujian 9 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,049 m³/s Mode Manual PID ($P=8, I=42, D=7$)</p>		<p>Pada proses ini terlihat bahwa proses cukup stabil dengan waktu mencapai suhu pemanasan yang singkat</p>
<p>Pengujian 10 <i>Single Heater</i> Set Value (SV) 100 °C Flow Capacity 0,049 m³/s Mode Manual PID ($P=8, I=42, D=7$)</p>		<p>Pada proses ini terlihat bahwa proses cukup stabil dengan waktu mencapai suhu pemanasan yang lebih panjang karena set value yang ditingkatkan</p>
<p>Pengujian 11 <i>Double Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,055 m³/s Mode Autotuning PID</p>		<p>Pengujian tidak didapatkan hasil nilai konstanta PID karena tidak mencapai titik set value. Mungkin flow capacity dari Fan yang terlalu besar, namun lembaran lebih cepat mencapai suhu forming.</p>
<p>Pengujian 12 <i>Double Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,053 m³/s Mode Autotuning PID</p>		<p>Pengujian tidak didapatkan hasil nilai konstanta PID karena tidak mencapai titik set value. Mungkin flow capacity dari Fan yang masih terlalu besar</p>
<p>Pengujian 13 <i>Double Heater</i> Set Value (SV) 110 °C Flow Capacity 0,049 m³/s Mode Autotuning PID</p>		<p>Pada pengujian ini didapatkan hasil nilai konstanta PID ($P = 11,4, I = 116, D = 20$) Namun waktu mencapai set value yang relative lebih panjang</p>

Pada penelitian ini terlihat bahwa pengaruh tegangan yang diberikan kepada *axial fan* mempengaruhi kinerja dari proses pemanasan. Tegangan pada kipas mempengaruhi *flow capacity* dari udara yang berpengaruh terhadap kemampuan pemanasan mencapai suhu tertentu.

Tabel 3. Pengaruh *Flow Capacity* Terhadap Capaian Variabel *Set Value*

Set Value	Flow Capacity 0,055 m ³ /s	Flow Capacity 0,053 m ³ /s	Flow Capacity 0,049 m ³ /s
80 °C	Tercapai (Pengujian 1)	-	-
90 °C	Tercapai (Pengujian 2)	-	-
100 °C	Tidak Tercapai (Pengujian 3)	Tercapai (Pengujian 5)	-
110 °C	Tidak Tercapai (Pengujian 4)	Tidak Tercapai (Pengujian 6)	Tercapai (Pengujian 7)

Pada pengujian ini terlihat juga bahwa pengaruh dari nilai PID mempengaruhi kinerja alat pemanas pada kondisi yang set value yang sama. Ini dapat dijelaskan dari perbandingan antara Pengujian 7 (Proses Autotuning) dan 9 (Proses Selftuning) pada parameter yang sama yaitu Set Value 110 °C dan Fan Flow Capacity 0,049 m³/s.

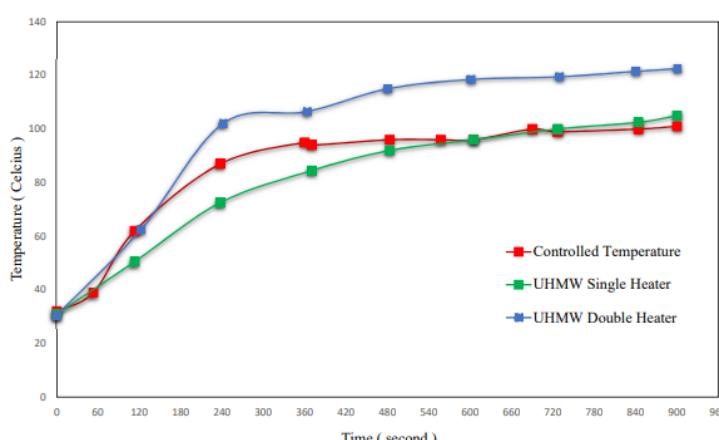


Gambar 8. Grafik Perbandingan Skema *Autotuning* dan *Selftuning*

Tabel 4. Perbandingan Skema *Autotuning* dan *Selftuning*

Parameter Perbedaan	Pengujian 7 (<i>Autotuning</i>) (P = 17,3 , I = 99 , D = 17)	Pengujian 9 (<i>Selftuning</i>) (P = 8 , I = 42 , D = 7)
<i>Rising Time</i>	Waktu set value 226 s	Waktu set value 162 s
<i>Overshoot</i>	116 °C / 110 °C	111 °C / 110 °C
<i>Undershoot</i>	103 °C / 110 °C	108 °C / 110 °C
<i>Settling time</i>	Settling time pada 367 s	Settling time pada 423 s

Pada pengujian ini dapat dianalisis pengaruh dari pemanasan lembaran menggunakan dua sisi pemanasan dan satu sisi pemanasan. Titik suhu yang dipakai pada grafik merupakan rata rata dari pembacaan suhu lembaran pada bagian atas dan bagian bawah (T_{avg}).



Gambar 9. Grafik Perbandingan Pemanasan *Single Heater* dan *Double Heater*

Dari grafik di atas dapat dianalisis bahwa pemanasan pada waktu yang sama menghasilkan nilai temperatur yang lebih tinggi pada penggunaan *double heater*. Hal ini dikarenakan pada pemanasan satu, pemanasan melakukan proses transfer panas konduksi yang menghasilkan nilai suhu pada bagian lembaran yang tidak dipanaskan memiliki nilai panas yang lebih rendah. Namun pada pemanasan dengan dua sisi pemanas, nilai suhu paparan yang diterapkan pada kedua sisi

tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pada proses pemanasan dua sisi terjadi konduksi untuk mengakumulasi panas yang diterima pada lembaran material.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan pengujian pada alat sheet heating diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Alat pemanasan yang dikontrol dengan *Temperature Controller Omron E5CC* dapat memanaskan lembaran *UHMW P1000* menggunakan skema PID
2. Dari proses *Autotuning* pada *Temperature Controller Omron E5CC* pada set value $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Flow Capacity* $0,049\text{ m}^3/\text{s}$ didapatkan bahwa proses menunjukkan grafik paling stabil dengan menghasilkan nilai $P = 8$, nilai $I = 42$, dan nilai $D = 7$.
3. Pemanasan dengan satu titik paparan sudah dapat melakukan proses sheet heating sampai suhu tekukan *UHMW P1000* pada suhu $100\text{-}110\text{ C}$ tanpa mengalami kecacatan pemanasan menggunakan 2 sisi paparan membutuhkan waktu 4-6 menit untuk dapat mencapai suhu penekukan tanpa defect pada lembaran *UHMW P1000*.
4. Pengaruh dari proses *autotuning* serta *selftuning* menghasilkan grafik PID yang berbeda pada parameter rising time, settling time, overshoot dan steady state error.

5. Daftar Pustaka

- [1] W. D. Callister Jr dan D. G. Rethwisch, *Characteristics, Application, and Processing of Polymers*. 2003. [Daring]. Tersedia pada: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>
- [2] S. M. Kurtz, *A Primer on UHMWPE*, Third Edit. Elsevier Inc., 2016.
- [3] Usman dan A. Busairi, “Uji Temperatur Elemen Pemanas Jenis Coil Terhadap Pembengkokan Termoplastik,” vol. 2, no. 2, hal. 16–23, 2020.
- [4] J. P. Patil, V. Nandedkar, S. Mishra, dan S. K. Saha, “Transient thermal analysis of close pressure thermoforming process,” *J. Manuf. Process.*, vol. 62, no. March 2019, hal. 513–522, 2021.
- [5] F. M. Schmidt, Y. Le Maoult, dan S. Monteix, “Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 143–144, no. 1, hal. 225–231, 2003.
- [6] M. Putra, “Rancang Bangun Panel Kontrol Sistem Manual dan Otomatis Oven Pengering Listrik Industri 24 kW,” 2022.
- [7] M. I. Gunawan, “Sistem Kendali Otomatis Pada Mesin Mesin Industri,” *TEDC*, vol. 9, no. 2, hal. 110–116, 2015.
- [8] et al Woolf, Peter, “Proportional Integral Derivative (PID) Control,” in *The Chemical Engineering Journal*, Michigan, United States: Libre Texts, 2024. [Daring]. Tersedia pada: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf))
- [9] M. Amin dan M. Syahputra Novelan, “Sistem Kendali Obstacle Avoidance Robot sebagai Prototype Social Distancing Menggunakan Sensor Ultrasonic dan Arduino,” *InfoTekJar J. Nas. Inform. dan Teknol. Jar.*, vol. 5, no. 1, hal. 148–153, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.30743/infotekjar.v5i1.3003>
- [10] L. T. Lim, R. Auras, dan M. Rubino, “Processing technologies for poly(lactic acid),” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, no. 8, hal. 820–852, 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.
- [11] Omron, “Technical Explanation for Temperature Controllers,” *Omron CSM Temp. TG*, vol. 6, no. 3, 2018.
- [12] Darius Yuhas, “Teori Bentangan,” 2018.