

Pengaruh Parameter Proses *Thermoforming* Terhadap Distribusi Ketebalan dan Akurasi Dimensi Produk

Cahyo Budiyanoro^a, Perwita Kurniawan^b

^a Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Brawijaya, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia, (0274) 387656

^b Politeknik ATMI Surakarta

Jl. Adisucipto (Mojo) No. 01 Karangasem Laweyan Surakarta, Indonesia

e-mail: cahyo_budi@umy.ac.id

Kata kunci

Thermoforming;
distribusi ketebalan;
akurasi ukuran;
parameter proses

ABSTRAK

Penelitian ini melihat pengaruh parameter-proses *thermoforming*, yaitu waktu pemanasan, *pre-stretching degree*, dan tingkat evakuasi vakum, terhadap distribusi ketebalan dinding dan akurasi dimensi produk plastik yang diproses dengan *thermoforming*. Penelitian dilakukan serangkaian percobaan dengan tiga variasi parameter-proses tersebut. Waktu pemanasan divariasikan masing-masing 30, 35 dan 40 detik, *pre-stretching degree* dari 0,1 hingga 0,3, dan *evacuation rate* dalam nilai 6 mm/detik, 8 mm/detik dan 10 mm/detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter yang mampu meminimalkan radius pada sudut specimen adalah: tingkat evakuasi 10 mm/detik, waktu pemanasan 40 detik dan *derajad pre-stretching* 0,1 Vst. Hasil produk *vacuum forming* dapat dioptimalkan dengan kombinasi tingkat evakuasi vakum yang tinggi, waktu pemanasan lebih lama dan *derajad pre-stretching* rendah.

Keyword:

Thermoforming; wall
thickness distribution;
dimensional accuracy;
processing
parameters

ABSTRACT

This study examines the influence of thermoforming process parameters, namely heating time, pre-stretching degree, and vacuum evacuation rate, on the distribution of wall thickness and dimensional accuracy of the product. The research involved a series of experiments with three variations of these process parameters. Heating time was varied at 30, 35, and 40 seconds, pre-stretching degree ranged from 0.1 to 0.3, and evacuation rates were set at 6 mm/s, 8 mm/s, and 10 mm/s, respectively. The results showed that the parameters capable of minimizing the radius at the specimen's corners were a vacuum evacuation rate of 10 mm/s, a heating time of 40 seconds, and a pre-stretching degree of 0.1 Vst. The findings suggest that the vacuum forming products can be optimized by combining a high vacuum evacuation rate, longer heating time, and low pre-stretching degree.

1. PENDAHULUAN

Vacuum forming adalah proses *thermoforming* plastik yang melibatkan pembentukan lembaran termoplastik menjadi bentuk tiga dimensi melalui pemanasan dan tekanan [1][2]. *Vacuum thermoforming* adalah metode yang baik untuk memproduksi suku cadang plastik yang memiliki detail tajam dan pas dengan produk tertentu. Proses *thermoforming* telah menjadi metode yang umum digunakan dalam pembentukan produk plastik. Metode ini melibatkan pemanasan dan penekanan pada lembaran plastik untuk mencapai bentuk yang diinginkan. Dalam proses *thermoforming*, beberapa parameter-proses seperti suhu lembaran, *derajad pre-stretching*, dan tingkat vakum memainkan peran kunci dalam mencapai distribusi ketebalan dinding yang optimal dan akurasi dimensi yang tinggi pada produk yang dihasilkan [3][4].

Distribusi ketebalan dinding dan akurasi dimensi merupakan dua aspek penting yang mempengaruhi kualitas dan kinerja komponen plastik. Distribusi ketebalan dinding yang merata penting untuk menjaga kekuatan struktural dan kinerja mekanik suku cadang, sementara akurasi dimensi yang tinggi memastikan kesesuaian dan kompatibilitas dengan komponen lain dalam suatu sistem.

Pada penelitian sebelumnya, beberapa studi telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh parameter-proses terhadap distribusi ketebalan dinding dan akurasi dimensi dalam proses thermoforming [5][6]. Namun, penelitian yang lebih rinci dan terfokus masih diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi antara parameter-proses tersebut.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki secara sistematis pengaruh suhu lembaran (waktu pemanasan), tingkat *pre-stretching*, dan tingkat vakum (*evacuation rate*) terhadap distribusi ketebalan dinding dan akurasi dimensi suku cadang yang diproses dengan thermoforming. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang pengaruh parameter-proses ini, diharapkan produsen dan perancang dapat mengoptimalkan proses *thermoforming* untuk mencapai suku cadang plastik yang berkualitas tinggi dan akurat dimensinya.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Material dan alat

Bahan yang digunakan dalam percobaan ini adalah lembaran *High Impact Polystyrene* (HIPS) buatan Pulixin, Hongkong dengan ketebalan 1 mm [7]. Saat memilih bahan, penting untuk mengetahui ketebalannya. Bahan yang terlalu tebal dapat menyebabkan masalah pada pemanasan dan deformasi. Di sisi lain, bahan yang terlalu tipis juga dapat menyebabkan masalah pada daya tahan terhadap gaya (mudah patah).

Beberapa properti bahan terkait parameter proses adalah sebagai berikut:

- Suhu leleh: 173 °C
- Melt Flow Index: 20 g/10 min pada suhu 230 °C.
- Densitas pada suhu kamar: 0,92 g/cm³

Perlengkapan eksperimen adalah:

- Mesin Formech 508FS vacuum former [8]
- Cetakan
- *Wall thickness sensor (ultrasonic)* dan temperature sensor (*pyrometer*)

2.2 Prosedur eksperimen

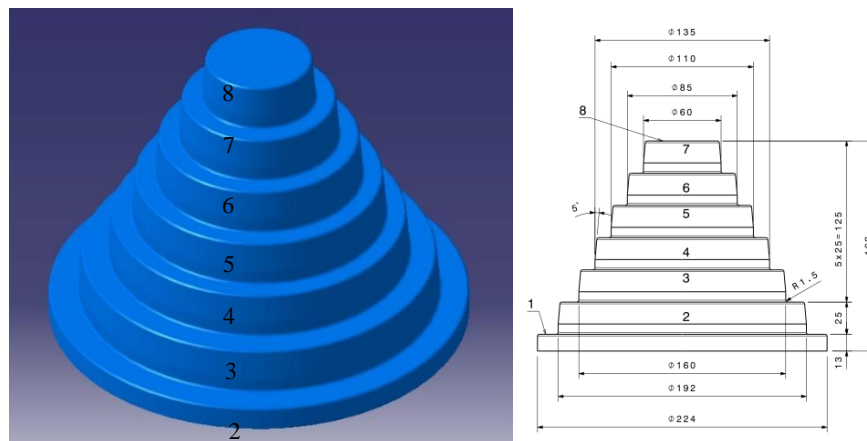
Tahapan siklus proses eksperimen yang secara detail dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Langkah pertama adalah pengaturan parameter suhu, *pre-stretching degree* dan *vacuum rate* [9].
- Setelah parameter-proses telah diatur, bahan thermoforming dipasang pada perangkat penjepit. Hal ini dilakukan untuk menjaga bahan tetap stabil selama proses. Selanjutnya, posisi bahan disesuaikan agar berada di tengah cetakan yang akan digunakan. Tujuannya adalah memastikan pembentukan yang simetris dan akurat.
- Bahan dipanaskan menggunakan oven atau pemanas infra merah. Pada tahap ini diperlukan percobaan awal untuk mendapatkan waktu pemanasan yang mampu menghasilkan suhu pemanasan yang ideal. Proses pemanasan bertujuan untuk membuat bahan menjadi lembut dan dapat dibentuk dengan mudah [10][11].
- Setelah bahan dipanaskan, tahap *pre-stretching* dilakukan dengan menerapkan tekanan udara pada permukaan bahan. Tahap *pre-stretching* ini membantu dalam pembentukan awal bahan sebelum proses pembentukan utama.
- Tekanan udara di sekitar bahan dikurangi dengan menciptakan vakum. Tekanan vakum ini membantu menarik bahan ke dalam cetakan dengan presisi dan menghilangkan udara yang terperangkap [12].
- Cetakan yang telah dipanaskan atau didinginkan kemudian dirapatkan dengan bahan yang telah dipanaskan. Hal ini memungkinkan bahan mengambil bentuk cetakan dengan akurat sesuai dengan desain yang diinginkan.
- Proses pembentukan utama dilakukan dengan menerapkan panas dan tekanan yang diperlukan pada bahan agar sesuai dengan bentuk cetakan. Bahan akan mengalami deformasi dan mengikuti kontur cetakan.

- Setelah proses pembentukan selesai, bahan dibiarkan mendingin secara alami pada suhu ruangan. Hal ini penting untuk memastikan bahan mengeras dan mempertahankan bentuk yang telah dibentuk dalam proses *thermoforming*.

2.3 Cetakan

Cetakan dirancang dalam bentuk diametral berundak untuk mempermudah pengamatan distribusi ketebalan pada tiap perubahan tingkat dan akurasi dimensi yang diwakili oleh radius di tiap sudut undakan. Gambar 1 menunjukkan bentuk dan dimensi cetakan. Pada permukaan bawah, permukaan atas dan sudut di tiap tingkat diberikan tanda penomoran.



Gambar 1. Bentuk dan dimensi cetakan

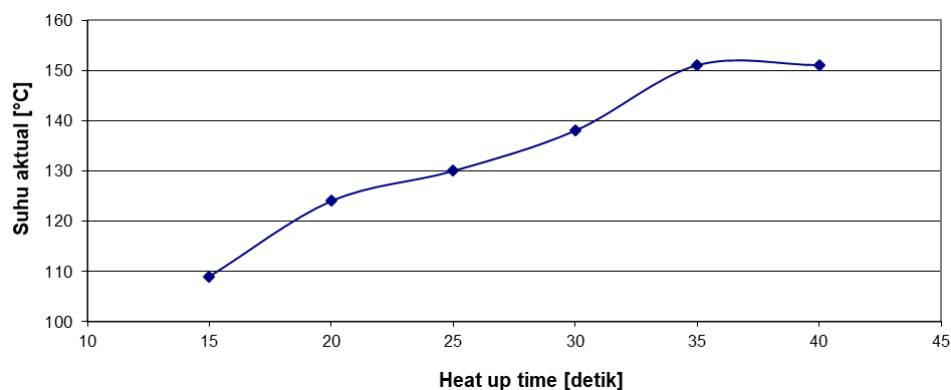
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Preliminary Trial

Percobaan awal dilakukan untuk mendapatkan rentang waktu pemanasan yang tepat sehingga percobaan utama dapat dilakukan dengan benar. Pemanas *infra-red* diatur pada suhu 250 °C, suhu aktual diukur dengan *pyrometer* pada permukaan lembaran plastik yang dipanaskan. Data percobaan awal ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Data percobaan awal

Heating time (detik)	15	20	25	30	35	40
Suhu aktual (°C)	109	124	130	138	151	151



Gambar 2. Penelitian awal untuk rentang pemanasan ideal

Seperti yang terlihat dalam percobaan awal, waktu pemanasan memiliki hubungan langsung dengan suhu. Dengan meningkatkan waktu pemanasan, suhu lembaran meningkat. Untuk mengukur suhu lembaran, penting untuk memiliki posisi dan jarak yang sama antara pirometer dan permukaan lembaran. Waktu pemanasan tidak boleh terlalu tinggi agar lembaran plastik tidak mengalami degradasi. Pada kasus

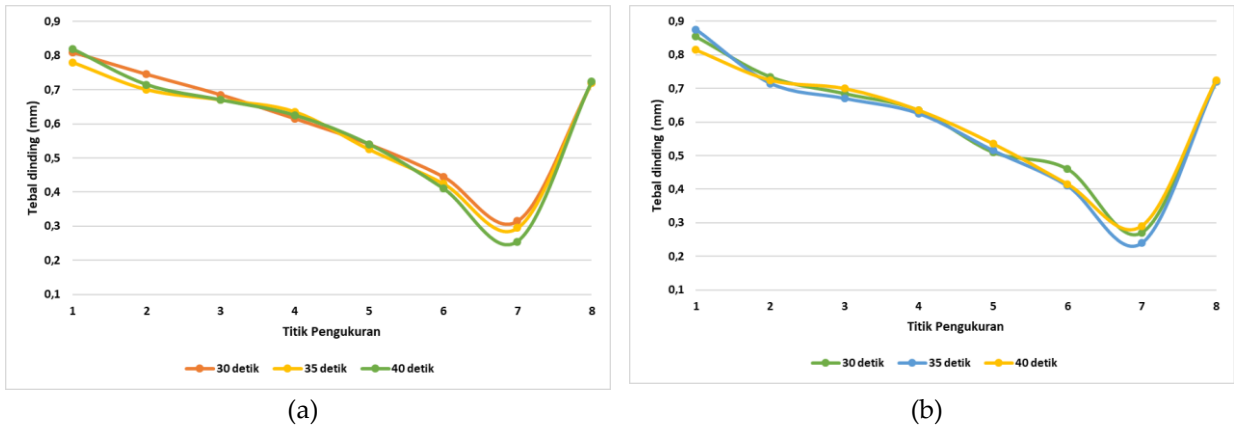
HIPS, suhu pemrosesan berada dalam rentang 130 - 150°C dengan rentang waktu pemanasan 30, 35, dan 40 detik, nilai ini juga sesuai dengan rekomendasi dari beberapa pembuat mesin [13]. Dalam setiap percobaan, ketebalan dinding dan radius pada posisi tertentu dari suku cadang yang terbentuk diukur seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

3.2 Percobaan 1

Pada percobaan ini digunakan variasi waktu pemanasan pada tingkat vakum maksimum dan tingkat pre-stretching yang konstan. Waktu pemanasan divariasikan masing-masing 30, 35, dan 40 detik, sedangkan derajat *pre-stretching* diatur pada 0,1 vst dan evacuation rate (vacuum rate) pada 10 mm/detik. Masing-masing pengujian diulang dua kali. Hasil percobaan berupa ketebalan dinding dan radius ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 3. Posisi pengukuran ketebalan dan radius diberikan dalam dua opsi yaitu simetri dan bias. Yang dimaksud posisi ukur simetri adalah tiap lokasi diukur pada arah permukaan yang sama pada tiap posisinya, sedangkan pengukuran bias adalah lokasi pengukuran yang diambil secara acak pada tiap posisi ketebalan dinding maupun radius.

Tabel 2. Data percobaan 1

Run	Waktu pemanasan (detik)	Pre-stretching Degree (vst)	Evacuation Rate (mm/detik)	Ketebalan dinding (mm)								r (mm) Rerata	
				Lokasi	1	2	3	4	5	6	7		8
1.1a	30	0.1	10	Simetri	0,86	0,77	0,71	0,62	0,54	0,44	0,30	0,70	9,5
1.1b					0,76	0,72	0,66	0,61	0,54	0,45	0,33	0,74	8,5
					0,81	0,75	0,69	0,62	0,54	0,45	0,32	0,72	9
1.1a	30	0.1	10	Bias	0,87	0,74	0,68	0,63	0,50	0,48	0,27	0,70	8,75
1.1b					0,84	0,73	0,69	0,64	0,52	0,44	0,27	0,74	8,75
					0,86	0,74	0,69	0,64	0,51	0,46	0,27	0,72	8,75
1.2a	35	0.1	10	Simetri	0,77	0,69	0,66	0,63	0,53	0,43	0,30	0,73	6,25
1.2b					0,79	0,71	0,68	0,64	0,52	0,42	0,29	0,71	7,5
					0,78	0,70	0,67	0,64	0,53	0,43	0,30	0,72	6,88
1.2a	35	0.1	10	Bias	0,86	0,70	0,66	0,62	0,52	0,42	0,24	0,73	6,75
1.2b					0,89	0,73	0,68	0,63	0,51	0,40	0,24	0,71	7,5
					0,88	0,72	0,67	0,63	0,52	0,41	0,24	0,72	7,13
1.3a	40	0.1	10	Simetri	0,83	0,72	0,68	0,65	0,60	0,44	0,29	0,74	7
1.3b					0,81	0,71	0,66	0,60	0,48	0,38	0,22	0,71	7
					0,82	0,72	0,67	0,63	0,54	0,41	0,26	0,73	7
1.3a	40	0.1	10	Bias	0,83	0,74	0,70	0,66	0,55	0,44	0,28	0,74	7,25
1.3b					0,80	0,71	0,70	0,61	0,52	0,39	0,30	0,71	6,75
					0,82	0,73	0,70	0,64	0,54	0,42	0,29	0,73	7

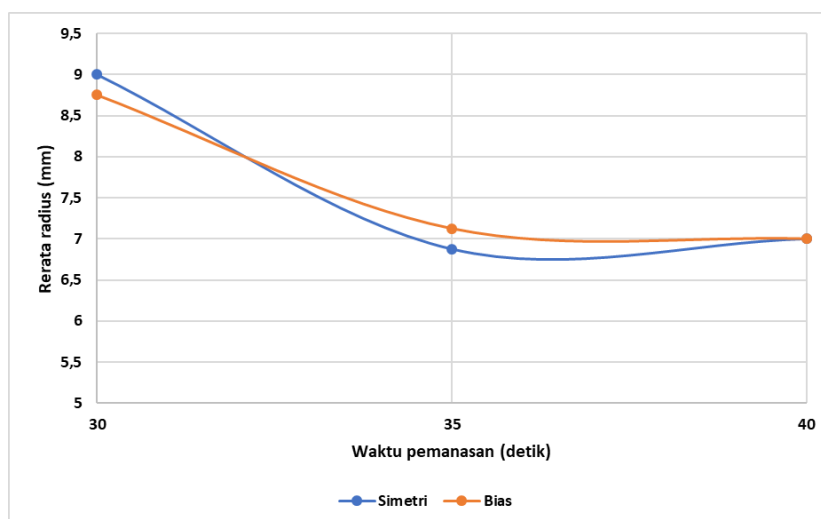


Gambar 3. Distribusi ketebalan variasi waktu pemanasan pada derajat *pre-stretching* 0,1 dan *evacuation rate* 10 mm/detik: (a) simetri; (b) bias

Hasil dari percobaan 1 menunjukkan efek waktu pemanasan terhadap ketebalan pada titik pengukuran yang berbeda dan terhadap radius spesimen. Pengukuran dilakukan pada 8 titik dalam posisi simetri dan posisi bias. Pada kedua posisi tersebut, hasilnya hampir sama. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.a dan Gambar 3.b, titik 1 dan 8 memiliki ketebalan yang lebih tinggi. Ketebalan secara bertahap berkurang dari titik 1 hingga titik 7. Alasannya adalah bahwa pada titik 1 dan titik 8 tidak ada peregangan. Namun, pada titik 7 terdapat gaya peregangan tertinggi. Semakin rendah peregangannya, semakin tinggi ketebalan dinding yang diperoleh. Dengan meningkatkan waktu pemanasan dari 30 menjadi 35, suhu lembaran juga meningkat. Hal ini mempengaruhi peregangan yang diterapkan pada lembaran, yang mengakibatkan penurunan. Namun, perbedaannya hanya sedikit ketika waktu pemanasan dinaikkan menjadi 40 detik, pengaruhnya terhadap suhu tidak signifikan. Peningkatan waktu pemanasan dapat memperbaiki akurasi dari radius produk [14], seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Pada waktu 40 detik tidak terjadi perbedaan radius di semua posisi pengukuran, Gambar 4 menampilkan hasil ini lebih jelas. Waktu pemanasan 40 detik dipertimbangkan sebagai kondisi optimal.

Tabel 3. Rata-rata radius yang diperoleh dari variasi waktu pemanasan pada derajat *pre-stretching* 0,1 dan *evacuation rate* 10 mm/detik

Waktu pemanasan (detik)	Rerata radius - posisi simetri (mm)	Rerata radius - posisi bias (mm)
30	9	8.75
35	6.88	7.13
40	7	7



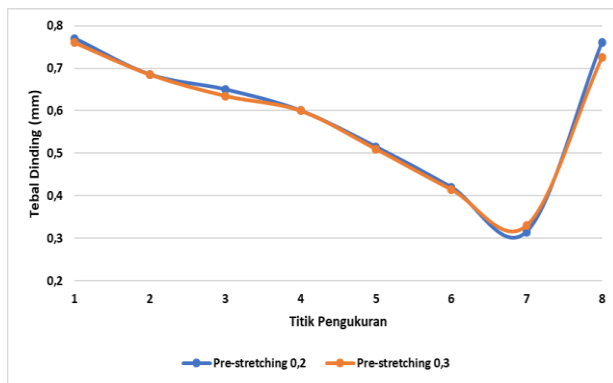
Gambar 4. Rerata radius dari variasi waktu pemanasan pada derajat *pre-stretching* 0,1 dan *evacuation rate* 10 mm/detik

3.3 Percobaan 2

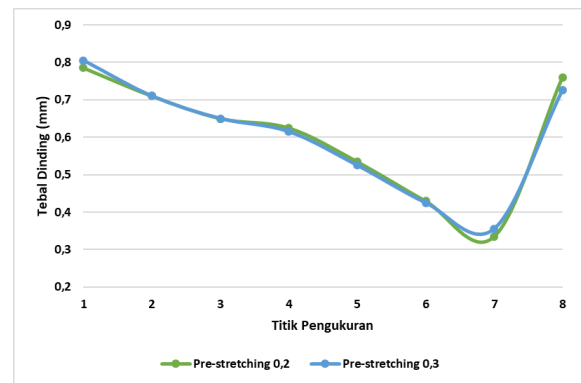
Pada percobaan kedua dilakukan dua variasi derajat *pre-stretching* yaitu 0,2 vst dan 0,3 vst. Beberapa jenis mesin memiliki mode pengaturan *pre-stretching* dengan ketelitian yang tinggi [15]. *Evacuation rate* diatur maksimum pada 10 mm/detik menggunakan waktu pemanasan yang optimal dari percobaan 1 yaitu selama 40 detik. Untuk tiap variasi derajat *pre-stretching*, data ukuran diambil dari dua kali percobaan, hasil percobaan ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 5.

Tabel 4. Data percobaan 2

Run	Waktu pemanasan (detik)	Pre-stretching Degree (vst)	Evacuation Rate (mm/detik)	Lokasi	Ketebalan dinding (mm)								r (mm) Rerata
					1	2	3	4	5	6	7	8	
2.1a	40	0,2	10	Simetri	0,81	0,73	0,66	0,60	0,52	0,41	0,31	0,77	8,5
2.1b					0,73	0,64	0,64	0,60	0,51	0,43	0,32	0,75	
Rerata					0,77	0,69	0,65	0,60	0,52	0,42	0,32	0,76	
2.1a	40	0,2	10	Bias	0,81	0,72	0,65	0,61	0,52	0,42	0,34	0,77	8,5
2.1b					0,76	0,70	0,65	0,64	0,55	0,44	0,33	0,75	
Rerata					0,79	0,71	0,65	0,63	0,54	0,43	0,34	0,76	
2.2a	40	0,3	10	Simetri	0,73	0,65	0,62	0,60	0,51	0,43	0,33	0,74	7
2.2b					0,79	0,72	0,65	0,60	0,51	0,40	0,33	0,71	
Rerata					0,76	0,69	0,64	0,60	0,51	0,42	0,33	0,73	
2.2a	40	0,3	10	Bias	0,79	0,69	0,65	0,63	0,54	0,43	0,37	0,74	7,25
2.2b					0,82	0,73	0,65	0,60	0,51	0,42	0,34	0,71	
Rerata					0,81	0,71	0,65	0,62	0,53	0,43	0,36	0,73	



(a)



(b)

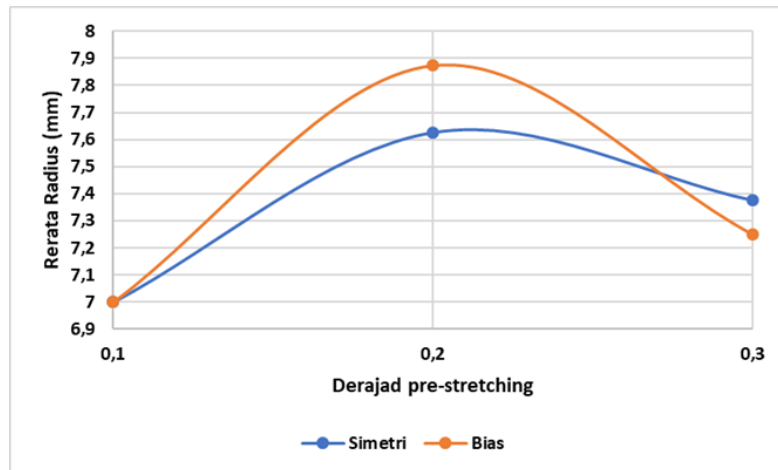
Gambar 5. Distribusi ketebalan untuk variasi derajat *pre-stretching* pada waktu pemanasan 40 detik dan *evacuation rate* 10 mm/detik: (a) simetri; (b) bias

Hasil dari percobaan ke-2 menunjukkan bahwa distribusi ketebalan pada 8 titik pengukuran baik dalam posisi simetris maupun bias serupa dengan percobaan ke-1. Pada titik 8, aliran molekul diabaikan dan tidak ada gaya peregangan. Peningkatan derajat *pre-stretching* mengakibatkan penurunan ketebalan, namun, efek perubahan tidak terlihat dengan jelas pada bagian radius (Tabel 5). Nilai radius bervariasi dan tidak memiliki korelasi yang kuat dengan derajat *pre-stretching*. Satu hal yang perlu diperhatikan, bagian radius pada derajat *pre-stretching* 0,2 Vst lebih tinggi dibandingkan yang lainnya, seperti ditampilkan pada Gambar 6. Ukuran radius pada parameter tersebut mengalami perbedaan di semua

bagian. Pada dasarnya, derajat *pre-stretching* adalah parameter untuk meningkatkan kualitas bagian dengan memberikan pre-orientasi pada aliran molekul setelah *heating* [16].

Tabel 5. Rata-rata radius yang diperoleh dari variasi derajat *pre-stretching* pada waktu pemanasan 40 detik dan *evacuation rate* 10 mm/detik

Derajat <i>pre-stretching</i> (Vst)	Rerata radius - posisi simetri (mm)	Rerata radius - posisi bias (mm)
0,1	7	7
0,2	7.63	7.88
0,3	7.38	7.25



Gambar 6. Rerata radius dari variasi derajat *pre-stretching* pada waktu pemanasan 40 detik dan *evacuation rate* 10 mm/detik

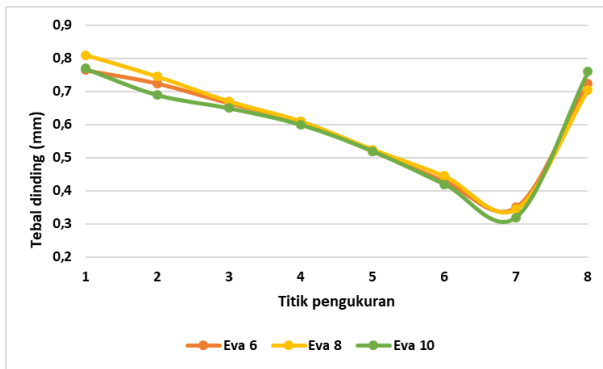
3.4 Percobaan 3

Percobaan ke 3 dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tingkat vakum terhadap ketebalan dinding rata-rata dan radius specimen. Percobaan ini menggunakan waktu pemanasan yang dioptimalkan dari percobaan ke-1 yaitu sebesar 40 detik dan derajat *pre-stretching* yang konstan (dari percobaan ke-1) sebesar 0,1 vst. Tingkat vakum (*evacuation rate*) divariasikan dalam nilai masing-masing 6 mm/s dan 8 mm/s, lebih rendah dari kedua percobaan sebelumnya. Hasil percobaan ditampilkan pada Tabel 6 dan Gambar 7.

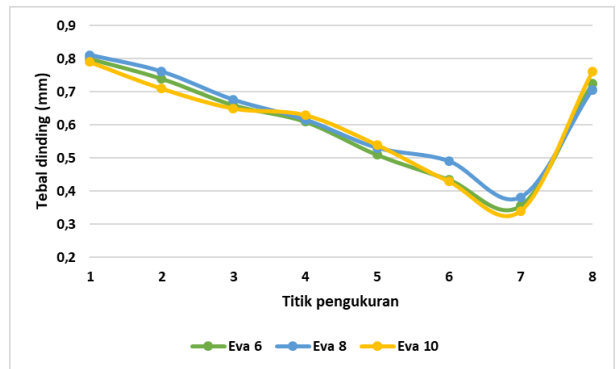
Tabel 6. Data percobaan 3

Run	Waktu pemanasan (detik)	<i>Pre-stretching Degree</i> (vst)	<i>Evacuation Rate</i> (mm/detik)	Ketebalan dinding (mm)								r (mm) Rerata	
				Lokasi	1	2	3	4	5	6	7		8
3.1a	40	0.2	6	Simetri	0,79	0,73	0,66	0,61	0,50	0,42	0,34	0,73	7,5
3.1b					0,74	0,72	0,67	0,61	0,54	0,44	0,36	0,72	9,5
					0,77	0,73	0,67	0,61	0,52	0,43	0,35	0,73	8,50
3.1a	40	0.2	6	Bias	0,81	0,73	0,66	0,60	0,51	0,44	0,33	0,73	7,5
3.1b					0,79	0,75	0,66	0,62	0,51	0,43	0,38	0,72	9,25
					0,80	0,74	0,66	0,61	0,51	0,44	0,36	0,73	8,38
3.2a	40	0.2	8	Simetri	0,79	0,74	0,67	0,61	0,53	0,45	0,34	0,71	8,5
3.2b					0,83	0,75	0,67	0,61	0,52	0,44	0,35	0,70	9,25
					0,81	0,75	0,67	0,61	0,53	0,45	0,35	0,71	8,88

Run	Waktu pemanasan (detik)	Pre-stretching Degree (vst)	Evacuation Rate (mm/detik)	Ketebalan dinding (mm)									r (mm) Rerata
				Lokasi	1	2	3	4	5	6	7	8	
3.2a	40	0.2	8	Bias	0,81	0,75	0,66	0,63	0,55	0,53	0,40	0,71	8,25
3.2b					0,81	0,77	0,69	0,60	0,51	0,45	0,36	0,70	8,75
				Rerata	0,81	0,76	0,68	0,62	0,53	0,49	0,38	0,71	8,50



(a)



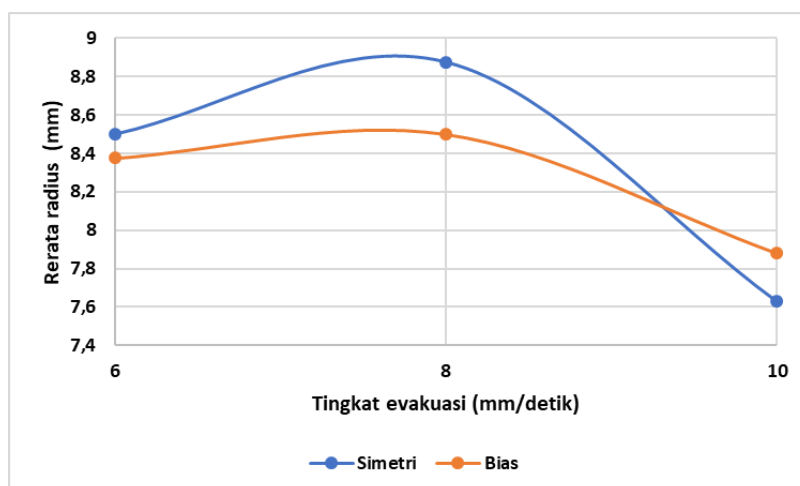
(b)

Gambar 7. Distribusi ketebalan dari variasi evacuation rate pada waktu pemanasan 40 detik dan derajat pre-stretching 0,2: (a) simetri; (b) bias

Dapat dilihat bahwa pada titik-titik pengukuran yang berbeda pengaruh parameter terhadap ketebalan spesimen selalu sama seperti dua percobaan sebelumnya. Pengaruh perubahan tingkat evakuasi dari 6 (mm/s) menjadi 8 (mm/s) dan 10 (mm/s) tidak signifikan; hanya terdapat sedikit perbedaan ketebalan antara satu percobaan dengan percobaan lainnya. Tabel 7 dan Gambar 8 menggambarkan bagian radius yang berkurang dengan peningkatan derajat evakuasi, dan hal ini menunjukkan peningkatan kualitas. Idealnya, radius bagian tidak boleh memiliki perbedaan yang terlalu besar dengan radius cetakan.

Tabel 7. Rata-rata radius yang diperoleh dari variasi evacuation rate pada waktu pemanasan 40 detik dan derajat pre-stretching 0,2

Tingkat vakum (mm/detik)	Rerata radius - posisi simetri [mm]	Rerata radius - posisi bias [mm]
10	7,63	7,88
8	8,88	8,5
6	8,5	8,38



Gambar 8. Rerata radius dari variasi evacuation rate pada waktu pemanasan 40 detik dan derajat pre-stretching 0,2

4. KESIMPULAN

Dari penelitian di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tidak terjadi perubahan pola distribusi ketebalan akibat perubahan parameter proses. Ketebalan dinding dalam posisi vertical akan mengalami penurunan akibat peningkatan tinggi specimen.
2. Parameter yang mampu meminimalkan radius pada sudut specimen adalah: tingkat evakuasi 10 mm/detik, waktu pemanasan 40 detik dan derajat pre-stretching 0,1 Vst.
3. Kualitas produk vacuum forming dapat dioptimalkan dengan kombinasi parameter: tingkat evakuasi tinggi, waktu pemanasan lebih lama dan derajat pre-stretching rendah

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknologi Plastik Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah atas dukungan perangkat yang membuat penelitian ini dapat diselesaikan dengan lancar.

REFERENSI

- [1] I. Mansoor, A. Naseer, and A. Qadeer, "Manufacturing of Economical Packing by Using Vacuum Forming Technique †," *Eng. Proc.*, vol. 12, no. 1, pp. 10–13, 2022, doi: 10.3390/engproc2021012074.
- [2] W. de O. Leite, J. C. C. Rubio, F. M. Cabrera, A. Carrasco, and I. Hanafi, "Vacuum thermoforming process: An approach to modeling and optimization using artificial neural networks," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.3390/polym10020143.
- [3] Z. Ayhan and Q. H. Zhang, "Wall thickness distribution in thermoformed food containers produced by a Benco aseptic packaging machine," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–10, 2000, doi: 10.1002/pen.11134.
- [4] E. Sasimowski, "The use of utility function for optimization of thermoforming," *Polimery/Polymers*, vol. 63, no. 11–12, pp. 807–814, 2018, doi: 10.14314/polimery.2018.11.9.
- [5] O. Eksi and S. Karabeyoğlu, "The Effect of Process Parameters on Thickness Distribution in Thermoforming," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 198–204, 2017, doi: 10.12913/22998624/71147.
- [6] S. Karabeyoglu, O. Eksi, and E. Erdoğan, "An Experimental Study on Wall Thickness Distribution in Thermoforming," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 139–142, 2017, doi: 10.12913/22998624/71148.
- [7] Pulixin, "HIPS Sheet," 2022. <https://pulixin.com.hk/ps-sheet-roll.html>
- [8] Formech, "Floor Standing Vacuum Forming Machine 508," Hertfordshire, 2022.
- [9] N. Adhikari, N. S. Timilsina, S. Gautam, S. Kaphle, and P. L. Shrestha, "Design and simulation of components of vacuum forming machine using household vacuum cleaner," *J. Eng. Issues Solut.*, vol. 1, no. 1, pp. 138–157, 2021, doi: 10.3126/joeis.v1i1.36834.
- [10] D. J. Lee and I. J. Shin, "Effects of vacuum, mold temperature and cooling rate on mechanical properties of press consolidated glass fiber/PET composite," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 8, pp. 1107–1114, 2002, doi: 10.1016/S1359-835X(02)00051-9.
- [11] M. S. Jamil, R. Khalid, A. Zulqarnain, and M. Salman, "Improving Thermoform Productivity : Case Of Design-Of-Experiment," *J. Qual. Technol. Manag.*, vol. XV, no. I, pp. 87–106, 2018.
- [12] Formech, "Vacuum Forming Guide," 2012. [Online]. Available: <http://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2018/12/Vacuum-Forming-Guide.pdf>
- [13] T. Penttil, "THERMOFORMING : THE EFFECTS OF MACHINE PARAMETERS TO THE PROCESS AND END PRODUCT," 2020.
- [14] E. Sasimowski and P. Filipek, "Thermoforming of a Polystyrene Sheet with a Vibrating Male Mold," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 246–254, 2019, doi: 10.12913/22998624/114028.
- [15] Illig, "Illig sheet forming process-controlled machines," Heilbronn, 2021.
- [16] E. S. Erdogan and O. Eksi, "Prediction of wall thickness distribution in simple thermoforming moulds," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 60, no. 3, pp. 195–202, 2014, doi: 10.5545/sv-jme.2013.1486.