SINERGI *Vol. 24, No.2, pp.262-269, Oktober 2026*
DOI : http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v24i2.6658

Optimasi Parameter Proses Vacuum Forming Lembaran PET dengan Metode Taguchi pada Mesin Plastic Vacuum Forming Otomatis

Muhammad Arsyad Suyuti[1*], Muas M[2], Alif S. Sanda[3], Makbul Mawarid[4], Wafiq Azizah Hasanuddin[5]

[1,2345]Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
*E-mail korespondensi: muhammadarsyadsuyuti@gmail.com

Abstract: Vacuum forming is a thermoforming process whose dimensional accuracy is strongly affected by process conditions, particularly sheet temperature, heating time, and vacuum application. This study focuses on optimizing the process parameters of an Arduino-based automatic plastic vacuum forming machine for Polyethylene Terephthalate (PET) sheets. The machine was designed, fabricated, assembled, and tested using PET sheets with thicknesses of 0.3, 0.5, and 0.75 mm. For the Taguchi optimization, three control factors were selected: heating temperature (100, 105, and 110 °C), heating time (20, 23, and 25 min), and vacuum time (10, 12, and 14 s). A three-level L9 orthogonal array was used. The response was dimensional deviation from the mold dimensions of 112 × 170 × 20 mm, with the characteristic Smaller-is-Better. For the 0.5-mm sheet, recalculation of the experimental data shows that the optimum combination based on the response means is 100 °C, 23 min, and 10 s (A1B2C1). The relative contributions to the composite dimensional-deviation response were 35.30% for heating time, 10.28% for temperature, and 4.26% for vacuum time, while the remaining variation was 50.15%. Across the three sheet thicknesses, the reported optimum settings were 100 °C–20 min–14 s for 0.3 mm, 100 °C–23 min–10 s for 0.5 mm, and 110 °C–30 min–10 s for 0.75 mm. The results confirm that PET thickness changes the thermal forming requirement and that the Taguchi method provides a systematic approach for selecting process settings with a limited number of experiments.

Keywords: vacuum forming; thermoforming; PET; Taguchi method; process optimization; dimensional accuracy.

Abstrak: Vacuum forming merupakan proses thermoforming yang akurasi dimensinya dipengaruhi oleh kondisi proses, terutama temperatur pemanasan, waktu pemanasan, dan waktu pemvakuman. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi parameter proses pada mesin plastic vacuum forming otomatis berbasis Arduino menggunakan lembaran Polyethylene Terephthalate (PET). Penelitian meliputi perancangan, pembuatan, perakitan, pengujian mesin, serta optimasi parameter proses. Material uji berupa lembaran PET dengan ketebalan 0,3; 0,5; dan 0,75 mm. Optimasi Taguchi menggunakan tiga faktor, yaitu temperatur pemanasan 100, 105, dan 110 °C; waktu pemanasan 20, 23, dan 25 menit; serta waktu vacuum 10, 12, dan 14 detik. Rancangan eksperimen menggunakan orthogonal array L9 tiga level. Respon yang dianalisis adalah penyimpangan dimensi produk terhadap ukuran cetakan 112 × 170 × 20 mm dengan karakteristik Smaller-is-Better. Pada PET 0,5 mm, analisis ulang data pengujian menunjukkan kombinasi optimum berdasarkan response mean adalah 100 °C, 23 menit, dan 10 detik (A1B2C1). Kontribusi relatif terhadap respon penyimpangan dimensi gabungan adalah 35,30% untuk waktu pemanasan, 10,28% untuk temperatur, dan 4,26% untuk waktu vacuum, sedangkan variasi sisanya sebesar 50,15%. Untuk ketiga ketebalan PET, kondisi optimum yang dilaporkan adalah 100 °C–20 menit–14 detik untuk 0,3 mm, 100 °C–23 menit–10 detik untuk 0,5 mm, dan 110 °C–30 menit–10 detik untuk 0,75 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketebalan lembaran memengaruhi kebutuhan termal proses pembentukan dan metode Taguchi dapat digunakan untuk menentukan kombinasi parameter secara sistematis dengan jumlah eksperimen yang terbatas.

Kata Kunci: vacuum forming; thermoforming; PET; metode Taguchi; optimasi proses; akurasi dimensi.

I. PENDAHULUAN

Penggunaan material plastik terus berkembang pada sektor manufaktur, terutama untuk kemasan dan produk yang membutuhkan material ringan, tahan korosi, memiliki sifat isolasi listrik, dan mudah dibentuk. Salah satu material yang banyak digunakan adalah Polyethylene Terephthalate (PET) karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, transparansi, ketahanan kimia, dan kemampuan proses yang sesuai untuk berbagai aplikasi [1], [2]. Dalam proses manufaktur berbasis lembaran, PET dapat dibentuk melalui thermoforming, termasuk vacuum forming, dengan memanaskan lembaran hingga kondisi yang memungkinkan material mengikuti geometri cetakan akibat perbedaan tekanan.

Pada proses vacuum forming, kualitas produk tidak hanya ditentukan oleh desain mesin dan cetakan, tetapi juga oleh kombinasi parameter proses. Temperatur dan waktu pemanasan menentukan kondisi termal serta kemampuan lembaran untuk mengalami deformasi, sedangkan proses evakuasi memengaruhi kecepatan lembaran mengikuti permukaan cetakan. Penelitian mengenai thermoforming menunjukkan bahwa perubahan waktu pemanasan, tingkat evakuasi vakum, dan parameter pembentukan dapat memengaruhi akurasi dimensi dan distribusi ketebalan produk [3]. Penelitian lain pada lembaran PET juga menunjukkan bahwa ketebalan material berkaitan dengan kebutuhan pemanasan; lembaran yang lebih tebal membutuhkan energi dan waktu pemanasan yang lebih besar untuk mencapai kondisi pembentukan yang sesuai [4].

Permasalahan utama pada mesin vacuum forming skala laboratorium adalah penentuan kombinasi parameter yang mampu menghasilkan produk dengan penyimpangan dimensi minimum tanpa melakukan terlalu banyak percobaan. Pendekatan satu faktor pada satu waktu berpotensi membutuhkan banyak pengujian dan tidak memberikan gambaran yang efisien mengenai kombinasi parameter. Oleh karena itu, metode Taguchi relevan digunakan karena memanfaatkan orthogonal array untuk mempelajari beberapa faktor dan level dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit. Pada proses thermoforming, penerapan Taguchi dan ANOVA telah digunakan untuk mengoptimasi keseragaman ketebalan serta mengidentifikasi parameter proses yang paling berpengaruh [5]. Studi yang lebih baru juga menunjukkan bahwa metode Taguchi dapat diterapkan pada proses extrusion vacuum-thermoforming untuk menentukan parameter kunci kualitas produk [6].

Mesin yang digunakan pada penelitian ini merupakan mesin plastic vacuum forming otomatis dengan sistem kendali Arduino dan antarmuka Nextion. Penelitian sebelumnya pada mesin yang sama menunjukkan bahwa mesin dapat membentuk lembaran PET menjadi bentuk mika 1A dan menghasilkan kombinasi parameter berbeda untuk setiap ketebalan [7]. Namun, naskah sebelumnya masih menempatkan Taguchi terutama sebagai bagian analisis, sementara judul, tujuan, rancangan eksperimen, definisi respon, dan pembahasan kontribusi faktor belum disusun secara eksplisit sebagai penelitian optimasi. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan secara khusus pada optimasi parameter proses vacuum forming dengan metode Taguchi dan memperkuat interpretasi hasil melalui perbandingan dengan penelitian thermoforming yang relevan.

Tujuan penelitian adalah menentukan kombinasi temperatur pemanasan, waktu pemanasan, dan waktu vacuum yang menghasilkan penyimpangan dimensi minimum pada produk PET serta mengidentifikasi faktor proses yang memberikan kontribusi relatif terbesar. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar pengaturan parameter operasi mesin vacuum forming otomatis dan menjadi acuan pengembangan pengujian lanjutan pada berbagai ketebalan lembaran PET.

II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Mesin dan material

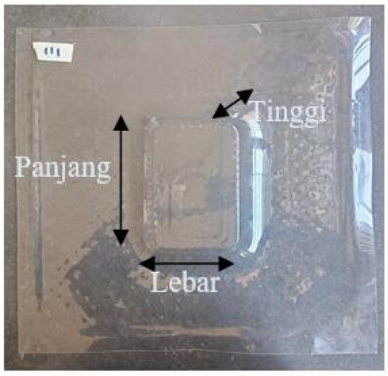
Penelitian dilaksanakan di bengkel mekanik Politeknik Negeri Ujung Pandang melalui tahapan perancangan, pembuatan, perakitan, pengujian, dan analisis data. Mesin memiliki dimensi 620 × 590 × 1000 mm, bed 400 × 400 mm, kemampuan vacuum maksimum 20 kPa, tubular heater dengan temperatur maksimum 270 °C, motor vacuum 1200 W, dan heater 1000 W. Sistem kendali menggunakan Arduino Mega 2560 Pro Mini, sensor RTD PT100, driver stepper A4988, motor stepper NEMA 23, relay, dan antarmuka Nextion LCD. Komponen utama mesin terdiri atas clamp, heater, bed, motor vacuum, dan mekanisme penggerak clamp. Rancangan dan hasil pembuatan mesin dipertahankan dari penelitian awal, tetapi rancangan eksperimen pada naskah ini diperjelas untuk menempatkan Taguchi sebagai metode optimasi.



Gambar 1. Mesin plastic vacuum forming otomatis hasil perancangan dan pembuatan.

2.2. Prosedur pengujian

Lembaran PET berukuran 400 × 400 mm digunakan sebagai material uji dengan tiga ketebalan, yaitu 0,3; 0,5; dan 0,75 mm. Lembaran dijepit pada clamp, kemudian parameter proses dimasukkan melalui Nextion LCD. Sistem otomatis menggerakkan clamp menuju area pemanasan, mengendalikan heater berdasarkan waktu yang ditetapkan, memindahkan lembaran menuju cetakan, dan mengaktifkan motor vacuum sesuai waktu pemvakuman. Setelah proses pembentukan selesai, produk dilepaskan dari clamp dan dimensinya diukur pada tiga arah utama, yaitu lebar, panjang, dan tinggi. Ukuran acuan cetakan adalah 112 mm × 170 mm × 20 mm.



Dimensi Cetakan		
Lebar (mm)	Panjang (mm)	Tinggi (mm)
112	170	20

Gambar 2. Produk hasil vacuum forming dan dimensi acuan cetakan.

2.3. Faktor dan level eksperimen Taguchi

Tiga faktor proses dipilih berdasarkan karakteristik mesin dan kebutuhan pembentukan PET, yaitu temperatur pemanasan (A), waktu pemanasan (B), dan waktu vacuum (C). Masing-masing faktor memiliki tiga level. Dengan tiga faktor dan tiga level, rancangan eksperimen menggunakan orthogonal array L9 sehingga hanya diperlukan sembilan kombinasi percobaan untuk satu ketebalan material. Rancangan ini digunakan secara terpisah untuk mengevaluasi pengaruh parameter pada material dengan ketebalan berbeda.

Tabel 1. Faktor dan level parameter proses yang digunakan pada rancangan Taguchi.

Faktor	Kode	Level 1	Level 2	Level 3
Temperatur pemanasan	A	100 °C	105 °C	110 °C
Waktu pemanasan	B	20 min	23 min	25 min
Waktu vacuum	C	10 s	12 s	14 s

2.4. Respon dan perhitungan penyimpangan dimensi

Respon utama didefinisikan sebagai rata-rata penyimpangan absolut tiga dimensi produk terhadap ukuran acuan cetakan. Untuk setiap run, penyimpangan dihitung dengan persamaan:

$$D = (|W - W_0| + |L - L_0| + |H - H_0|) / 3$$

dengan D adalah penyimpangan dimensi rata-rata (mm), W, L, dan H adalah hasil pengukuran lebar, panjang, dan tinggi produk, sedangkan $W_0 = 112$ mm, $L_0 = 170$ mm, dan $H_0 = 20$ mm merupakan dimensi acuan cetakan. Karakteristik kualitas yang digunakan adalah Smaller-is-Better karena tujuan optimasi adalah meminimalkan penyimpangan terhadap dimensi cetakan. Signal-to-noise ratio dihitung menggunakan $S/N = -10 \log_{10}[(\Sigma y_i^2)/n]$, sesuai karakteristik Smaller-is-Better [8]. Nilai S/N yang lebih tinggi menunjukkan kondisi yang lebih baik karena menunjukkan penyimpangan yang lebih kecil.

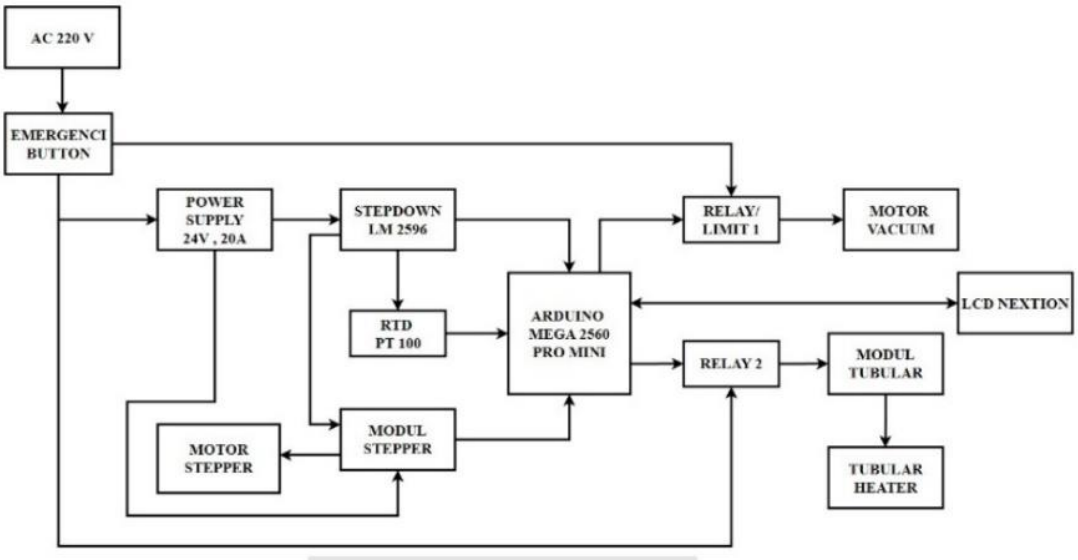
2.5. Analisis Taguchi dan ANOVA

Analisis dilakukan dengan membandingkan response mean dan S/N ratio pada setiap level faktor. Kombinasi optimum ditentukan dari level yang memberikan response mean terendah dan S/N ratio tertinggi. Selanjutnya, analisis kontribusi relatif dilakukan menggunakan ANOVA terhadap respon penyimpangan dimensi gabungan. Persentase kontribusi setiap faktor dihitung dari rasio sum of squares faktor terhadap total sum of squares. Karena rancangan L9 tanpa pengulangan hanya menyediakan dua derajat bebas untuk galat setelah tiga faktor utama dihitung, komponen galat juga dapat mencakup pengaruh interaksi dan variasi eksperimen yang tidak dimodelkan. Oleh sebab itu, nilai kontribusi digunakan untuk menunjukkan dominasi relatif faktor, bukan sebagai bukti tunggal signifikansi statistik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kinerja mesin dan sistem kendali

Hasil perancangan menghasilkan mesin vacuum forming otomatis yang mengintegrasikan sistem mekanik, pemanas, sistem vacuum, sensor temperatur, dan kendali berbasis Arduino. Alur kendali dimulai dari sumber 220 V AC, pengamanan melalui emergency button, distribusi daya melalui power supply, pengaturan aktuator melalui relay dan driver stepper, serta pemantauan temperatur melalui RTD PT100 yang ditampilkan pada Nextion LCD. Integrasi tersebut memungkinkan parameter temperatur dan waktu proses ditetapkan secara konsisten pada setiap percobaan sehingga variasi yang diamati lebih terfokus pada faktor proses yang dirancang.



Gambar 3. Diagram sistem kendali mesin vacuum forming otomatis.

3.2. Hasil eksperimen Taguchi untuk PET 0,5 mm

Data pengujian PET 0,5 mm terdiri atas sembilan kombinasi sesuai orthogonal array L9. Dimensi hasil pembentukan kemudian dibandingkan dengan dimensi cetakan. Berdasarkan data asli pada naskah, respon penyimpangan dihitung ulang menggunakan rata-rata penyimpangan absolut tiga dimensi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai penyimpangan terendah pada sembilan run adalah 1,23 mm pada run 5 (A2B2C3), sedangkan kombinasi optimum Taguchi berdasarkan response mean adalah A1B2C1.

Tabel 2. Data eksperimen PET 0,5 mm dan penyimpangan dimensi hasil perhitungan.

Run	A	B	C	Lebar (mm)	Panjang (mm)	Tinggi (mm)	D (mm)
1	1	1	1	114	172	20.5	1.50
2	1	2	2	116	173	20.0	2.33
3	1	3	3	117	173	20.9	2.97
4	2	1	2	117	175	18.5	3.83
5	2	2	3	114	171	19.3	1.23
6	2	3	1	115	177	18.5	3.83
7	3	1	3	119	172	19.1	3.30
8	3	2	1	115	173	20.1	2.03
9	3	3	2	117	171	18.7	2.43

3.3. Response mean dan S/N ratio

Karakteristik Smaller-is-Better digunakan karena semakin kecil nilai penyimpangan, semakin dekat dimensi produk terhadap cetakan. Hasil response mean menunjukkan bahwa level terbaik untuk faktor A adalah A1 (100 °C), untuk faktor B adalah B2 (23 menit), dan untuk faktor C adalah C1 (10 detik). Hasil ini menghasilkan kombinasi optimum A1B2C1. Pada analisis S/N, kombinasi yang lebih baik ditunjukkan oleh nilai S/N yang lebih tinggi.

Tabel 3. Response mean dan S/N ratio hasil analisis Taguchi untuk PET 0,5 mm.

Level	A Mean	A S/N	B Mean	B S/N	C Mean	C S/N
1	2.267	-7.402	2.878	-9.675	2.456	-8.467
2	2.967	-10.130	1.867	-5.682	2.867	-9.389
3	2.589	-8.440	3.078	-9.915	2.500	-8.495

Perbedaan hasil antara response mean dan S/N tidak mengubah pemilihan kombinasi optimum karena kedua pendekatan menunjukkan level temperatur 100 °C dan waktu vacuum 10 detik sebagai kondisi yang lebih baik, sedangkan waktu pemanasan optimum berdasarkan response mean adalah 23 menit. Penggunaan S/N penting karena mempertimbangkan kestabilan respon terhadap variasi, sedangkan response mean memudahkan interpretasi nilai penyimpangan aktual [8], [9].

3.4. Kontribusi faktor proses

Tabel 4. Kontribusi relatif faktor terhadap respon penyimpangan dimensi PET 0,5 mm.

Sumber variasi	Sum of Squares	Kontribusi
Temperatur (A)	0.7365	10.28%
Waktu pemanasan (B)	2.5291	35.30%
Waktu vacuum (C)	0.3054	4.26%
Error/variasi tak termodelkan	3.5928	50.15%
Total	7.1640	100.00%

Pada respon gabungan tiga dimensi, waktu pemanasan memberikan kontribusi relatif terbesar di antara tiga faktor utama, yaitu 35,30%, diikuti temperatur 10,28% dan waktu vacuum 4,26%. Variasi yang belum terjelaskan mencapai 50,15%. Nilai ini perlu ditafsirkan secara hati-hati karena rancangan L9 tanpa pengulangan tidak memisahkan secara penuh interaksi antarfaktor dan variasi eksperimen. Dengan demikian, hasil ANOVA pada penelitian ini lebih tepat digunakan untuk menunjukkan kecenderungan dominasi faktor daripada menyatakan signifikansi statistik secara definitif.

3.5. Penentuan parameter optimum

Berdasarkan response mean, kombinasi optimum untuk PET 0,5 mm adalah A1B2C1, yaitu temperatur 100 °C, waktu pemanasan 23 menit, dan waktu vacuum 10 detik. Nilai prediksi response mean pada kombinasi optimum Taguchi adalah sekitar 1.37 mm. Nilai tersebut merupakan prediksi berdasarkan efek utama dan belum dapat disebut sebagai hasil validasi karena kombinasi A1B2C1 tidak termasuk sembilan kombinasi L9 yang diuji secara langsung. Untuk memperkuat klaim optimasi pada penelitian lanjutan, kondisi optimum perlu dikonfirmasi melalui eksperimen validasi dengan beberapa pengulangan.

3.6. Pengaruh ketebalan PET dan perbandingan dengan penelitian terdahulu

Ketebalan lembaran memengaruhi kebutuhan pemanasan karena material yang lebih tebal membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi termal yang sesuai untuk pembentukan. Hal ini sejalan dengan penelitian thermoforming PET yang menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan berhubungan dengan peningkatan kebutuhan pemanasan [4]. Penelitian lain pada thermoforming juga menunjukkan bahwa waktu pemanasan dan tingkat evakuasi merupakan parameter penting terhadap akurasi dimensi dan karakteristik geometri produk [3]. Pada penelitian Taguchi khusus thermoforming, temperatur pemanas, jarak pemanas, draw ratio, waktu pemanasan, dan ketebalan lembaran dianalisis menggunakan orthogonal array dan ANOVA untuk memperoleh kondisi proses yang meningkatkan keseragaman ketebalan [5]. Penelitian Chen et al. juga menunjukkan bahwa Taguchi dapat digunakan untuk mengidentifikasi parameter kunci pada proses vacuum-thermoforming dan mengaitkannya dengan kualitas produk, efisiensi proses, dan konsumsi energi [6].

Tabel 5. Ringkasan kondisi optimum berdasarkan ketebalan PET.

Ketebalan PET	Temperatur	Waktu pemanasan	Waktu vacuum	Keterangan
0,30 mm	100 °C	20 menit	14 detik	Kondisi optimum yang dilaporkan pada naskah awal
0,50 mm	100 °C	23 menit	10 detik	Hasil optimasi Taguchi pada naskah revisi
0,75 mm	110 °C	30 menit	10 detik	Kondisi optimum yang dilaporkan pada naskah awal

Perbedaan kondisi optimum tersebut menunjukkan bahwa satu set parameter tidak dapat langsung diterapkan untuk seluruh ketebalan PET. Pada lembaran 0,75 mm, temperatur dan waktu pemanasan yang lebih tinggi diperlukan dibandingkan lembaran 0,3 dan 0,5 mm. Temuan tersebut konsisten dengan prinsip proses thermoforming bahwa distribusi temperatur dan waktu untuk mencapai kondisi pembentukan dipengaruhi oleh ketebalan lembaran [3], [4]. Di sisi lain, hasil penelitian Budiyantoro dan Kurniawan menunjukkan bahwa peningkatan laju evakuasi dapat memperbaiki karakteristik geometri, sehingga kontrol proses vacuum juga perlu dipertimbangkan bersama parameter termal [3]. Studi Taguchi pada extrusion vacuum-forming memperkuat bahwa pendekatan desain eksperimen dapat

digunakan untuk menyaring parameter kunci dan memperoleh kombinasi yang lebih efisien dibandingkan pengujian konvensional [6].

3.7. Implikasi hasil dan keterbatasan penelitian

Secara praktis, hasil penelitian memberikan pengaturan awal yang dapat digunakan pada mesin untuk membentuk PET dengan ketebalan berbeda. Namun, optimasi yang diperoleh masih dibatasi oleh tiga faktor utama dan tiga level yang dipilih. Variabel seperti jarak heater terhadap lembaran, distribusi temperatur permukaan, tingkat vacuum aktual, temperatur cetakan, laju pendinginan, geometri cetakan, dan kondisi lingkungan belum dimasukkan sebagai faktor eksperimen. Selain itu, validasi kondisi optimum dan pengulangan eksperimen diperlukan untuk menguji repeatability serta memperkirakan ketidakpastian hasil. Keterbatasan tersebut perlu dicantumkan agar klaim optimasi tetap proporsional terhadap rancangan eksperimen yang dilakukan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengarahkan analisis mesin plastic vacuum forming otomatis menjadi penelitian optimasi parameter proses dengan metode Taguchi. Untuk lembaran PET 0,5 mm, dengan faktor temperatur pemanasan 100–110 °C, waktu pemanasan 20–25 menit, dan waktu vacuum 10–14 detik, analisis orthogonal array L9 menunjukkan kombinasi optimum berdasarkan response mean adalah 100 °C, 23 menit, dan 10 detik (A1B2C1). Respon penyimpangan dimensi dihitung terhadap ukuran cetakan 112 × 170 × 20 mm dengan karakteristik Smaller-is-Better. Pada analisis kontribusi relatif, waktu pemanasan memberikan kontribusi terbesar di antara faktor utama sebesar 35,30%, diikuti temperatur 10,28% dan waktu vacuum 4,26%, sedangkan variasi sisanya sebesar 50,15% belum terjelaskan oleh model faktor utama.

Perbandingan antar ketebalan menunjukkan bahwa kondisi optimum berubah mengikuti ketebalan PET, yaitu 100 °C–20 menit–14 detik untuk 0,3 mm, 100 °C–23 menit–10 detik untuk 0,5 mm, dan 110 °C–30 menit–10 detik untuk 0,75 mm. Temuan ini memperkuat bahwa parameter termal perlu disesuaikan dengan ketebalan material. Untuk penelitian lanjutan, kondisi optimum perlu dikonfirmasi melalui eksperimen validasi dan pengulangan, serta dapat diperluas dengan memasukkan faktor tingkat vacuum aktual, jarak heater, temperatur cetakan, dan laju pendinginan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Okatama, “Analisa Peleburan Limbah Plastik Jenis Polyethylene Terephtalate (PET) Menjadi Biji Plastik Melalui Pengujian Alat Pelebur Plastik,” Jurnal Teknik Mesin (JTM), vol. 05, no. 3, pp. 109–113, 2016.

[2] I. R. Nur Rais, S. Hastuti, H. Hardono, and M. A. Adib, “Analisa Vacuum Forming Cetakan Agar-Agar Berbahan Baku Polyethylene Terephthalate (PET),” Jurnal Teknik Mesin MERC (Mechanical Engineering Research Collection), 2018.

[3] C. Budiyantoro and P. Kurniawan, “Pengaruh Parameter Proses Thermoforming Terhadap Distribusi Ketebalan dan Akurasi Dimensi Produk,” JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur), vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.18196/jmpm.v7i1.18717.

[4] J. Enguix et al., “Oxygen transmission rate through thermoformed trays: Modeling and influence of processing variables,” Polymer Engineering & Science, 2022, doi: 10.1002/pen.26130.

[5] N. K. Triều, C. M. Quang, N. X. Chiến, P. H. A. Dương, P. M. Hùng, and N. T. Phi, “Taguchi Optimization of Process Parameters for Thickness Uniformity of a Thermoforming Process,” Journal of Science and Technology – IUH, vol. 45, no. 1, 2021, doi: 10.46242/jst-iuh.v45i01.1000.

[6] D.-C. Chen, D.-F. Chen, and S.-M. Huang, “Applying the Taguchi Method to Improve Key Parameters of Extrusion Vacuum-Forming Quality,” Polymers, vol. 16, no. 8, 1113, 2024, doi: 10.3390/polym16081113.

[7] M. A. Suyuti, M. Muas, A. S. Sanda, M. Mawarid, and W. A. Hasanuddin, “Rancang Bangun Mesin Plastic Vacuum Forming Otomatis,” Politeknik Negeri Ujung Pandang Repository, 2024.

[8] Minitab, “What is the signal-to-noise ratio in a Taguchi design?,” Minitab Support, 2026.

[9] Minitab, “Analyze Taguchi Design (Static): Select the options,” Minitab Support, 2026.

[10] S. Prasetya, H. M. Ridlwan, M. Muslimin, S. Mulyono, and I. Assagaf, "Kontrol Suhu Mesin Vacuum Forming Otomatis Aneka Bentuk Kemasan dengan HMI," Jurnal Poli-Teknologi, vol. 17, no. 3, pp. 259–268, 2019, doi: 10.32722/pt.v17i3.