

OPTIMASI PARAMETER INJECTION MOULDING TERHADAP PENYIMPANGAN VOLUME GANTUNGAN PAKAIAN POLIPROPILENA MENGUNAKAN METODE TAGUCHI

Fachrizal Cesar Putra^{*1}, Bahdin Ahad Badia², Samhuddin³, Muhammad Idris Putra⁴, Citra Yurnidar Syah⁵, Raja Agung Hasudungan Simanjuntak⁶

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Tenggara, Indonesia

^{2,3,4,5} Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

⁶ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Tenggara, Indonesia

e-mail: *fachrizalcesarputra@gmail.com

Abstrak

Produk gantungan pakaian (clothes hanger) berbahan polipropilena banyak diproduksi melalui injection moulding, dan variasi volume produk dikeluhkan karena berkaitan dengan kekuatan serta ketahanan produk. Penelitian ini bertujuan menentukan kombinasi parameter proses yang diprediksi optimal terhadap volume produk gantungan pakaian dengan desain eksperimen Taguchi. Empat parameter dikaji pada tiga level: temperatur pemanasan (200, 250, 300 °C), temperatur pendinginan (10, 15, 20 °C), waktu injeksi (10, 14, 18 detik), dan waktu pendinginan (15, 20, 25 detik), dalam matriks ortogonal L9(3⁴) dengan tiga replikasi (27 pengamatan). Volume dihitung dari massa produk dengan densitas tetap, sehingga setara dengan pengukuran massa. Rasio signal to noise (S/N) dihitung dari selisih volume terhadap target 89,63 cm³ dengan kriteria smaller the better, sehingga mengukur kedekatan terhadap target, bukan semata-mata keseragaman volume. Pada ANOVA S/N (sembilan nilai S/N, faktor B digabung ke galat), kontribusi faktor adalah temperatur pemanasan 54,33%, waktu injeksi 21,67%, dan waktu pendinginan 10,44%. Hanya temperatur pemanasan yang signifikan pada $\alpha = 0,10$ ($p = 0,055$); waktu injeksi ($p = 0,119$) dan waktu pendinginan ($p = 0,197$) tidak signifikan. Analisis tambahan pada 27 data mentah menunjukkan temperatur pemanasan, waktu injeksi, dan waktu pendinginan signifikan, sedangkan temperatur pendinginan tidak signifikan ($p = 0,709$). Kombinasi 300 °C, 15 °C, 10 detik, dan 15 detik merupakan prediksi optimum yang belum dikonfirmasi eksperimen. Kesesuaian hasil manual dan Minitab hanya menunjukkan konsistensi perhitungan.

Kata kunci—Injection Moulding, Metode Taguchi, Polipropilena, Rasio Signal to Noise, Volume Produk

Abstract

Polypropylene clothes hangers are widely produced by injection moulding, and volume variation is a common concern because it relates to product strength and durability. This study determines the parameter combination predicted to be optimal for hanger volume using the Taguchi design. Four parameters were examined at three levels: heating temperature (200, 250, 300 °C), cooling temperature (10, 15, 20 °C), injection time (10, 14, 18 s), and cooling time (15, 20, 25 s), in an L9(3⁴) orthogonal array with three replications (27 observations). Volume was calculated from product mass using a fixed density, so it is equivalent to a mass measurement. The signal to noise (S/N) ratio was computed from the deviation of volume from a target of 89.63 cm³ using the smaller-the-better criterion, so it measures closeness to the target rather than volume uniformity alone. In the S/N ANOVA (nine S/N values, factor B pooled into error), the contributions were heating temperature 54.33%, injection time 21.67%, and cooling time 10.44%. Only heating

temperature was significant at $\alpha = 0.10$ ($p = 0.055$); injection time ($p = 0.119$) and cooling time ($p = 0.197$) were not. A supplementary analysis of the 27 raw data showed heating temperature, injection time, and cooling time to be significant and cooling temperature not ($p = 0.709$). The combination of 300 °C, 15 °C, 10 s, and 15 s is a predicted optimum that has not been confirmed experimentally. Agreement between manual and Minitab results shows only computational consistency.

Keywords—Injection Moulding, Taguchi Method, Polypropylene, Signal to Noise Ratio, Product Volume

1. PENDAHULUAN

Plastik kini menjadi material yang sangat penting dalam kehidupan modern. Bobotnya ringan, mudah dibentuk, tidak mudah berkarat atau bereaksi dengan bahan kimia, merupakan isolator listrik yang baik, dan harganya lebih murah daripada logam atau keramik. Dengan sifat-sifat itu, plastik dipakai luas pada perabot rumah tangga, komponen otomotif, kemasan, dan komponen elektronik. Di industri manufaktur, salah satu cara pembentukan plastik yang paling umum adalah *injection moulding*: pelet plastik dilelehkan oleh mesin injeksi, lalu leburan disuntikkan ke rongga cetakan (*mold*) sehingga terbentuk produk sesuai geometri rancangan [1], [3]. Proses ini menawarkan ketelitian dimensi yang tinggi, waktu siklus yang singkat, dan biaya per unit yang rendah.

Gantungan pakaian (*clothes hanger*) adalah salah satu produk plastik yang sangat umum di rumah tangga, dipakai untuk menggantung baju, celana, pakaian dalam, topi, maupun dasi. Harganya murah dan permintaannya tinggi, sehingga produk ini lazim dibuat dalam jumlah besar memakai *mold multi-cavity*. Volume atau ketebalan hasil cetakan dikaitkan dengan daya tahan gantungan: volume yang terlalu kecil berisiko membuat produk kurang kuat menahan beban pakaian, sedangkan volume yang berlebih memboroskan material dan memperpanjang waktu siklus produksi.

Volume produk *injection moulding* sangat bergantung pada seberapa penuh lelehan plastik mengisi rongga cetakan sebelum membeku. Hal ini ditentukan oleh interaksi temperatur pemanasan, temperatur pendinginan, waktu injeksi, dan waktu pendinginan. Bila temperatur pemanasan terlalu rendah, viskositas lelehan tinggi sehingga rongga tidak terisi sempurna; bila waktu pendinginan kurang memadai, produk berisiko mengalami deformasi dan penyusutan (*shrinkage*) [2], [6]. Pengaturan parameter yang kurang tepat dikaitkan dengan variasi volume serta cacat seperti *short shot*, *sink mark*, *flash*, dan *warpage* [6], [9].

Berbagai penelitian telah mengkaji optimasi parameter proses *injection moulding*. Moayyedian dkk. [1] menerapkan jaringan saraf tiruan dan teknik Taguchi pada bagian polipropilena berdinding tipis, dengan validasi simulasi elemen hingga, untuk menekan cacat *short shot*, penyusutan, dan *warpage*. Kumar dan Bairwa [2] menerapkan Taguchi untuk menurunkan cacat pada toples plastik polipropilena, Liou dkk. [3] mengembangkan sistem kendali proses adaptif berbasis profil tekanan nosel dan gaya penjepitan, dan Trotta dkk. [4] mengkaji lima parameter proses (temperatur leleh, tekanan penahanan, temperatur cetakan, kecepatan injeksi, dan waktu penahanan) terhadap massa komponen dan kemungkinan terbentuknya flash pada micro injection moulding. Trinh [5] mengkaji pengaruh parameter proses terhadap densitas dan massa produk, Chaciński dan Sutowski [6] merangkum cacat umum *injection moulding*, dan Hamzaçebi [7] membahas metode Taguchi sebagai perangkat robust design.

Di lingkup nasional, Serfandi dkk. [8], Muchyidin dkk. [9], dan Hidayat dkk. [10] masing-masing mengkaji waktu dan tekanan injeksi, waktu penekanan, dan pendekatan response surface terhadap kualitas produk plastik. Susilo dkk. [11] mengkaji temperatur dan waktu injeksi terhadap

berat akhir produk, Siswoyo dan Mas'ud [12] serta Intan dan Supriyadi [13] menerapkan Taguchi untuk memperbaiki cacat dan kualitas produk, dan Handono dan Hernadewita [14] memadukan Taguchi dengan simulasi Moldflow. Rahman dkk. [15] dan Halimah dan Ekawati [16] menerapkan Taguchi pada produk dan material lain, Bisono dkk. [17] dan Ramadhan dan Bisono [18] mengkaji parameter injeksi terhadap cacat produk, Kusuma dan Khoiroh [19] menerapkan Taguchi untuk menurunkan penolakan produk, dan Fadlillah dan Hardjito [20] mengkaji tekanan injeksi, tekanan penahanan, dan temperatur nosel terhadap cacat flash.

Berdasarkan judul dan ruang lingkup yang dilaporkan, studi yang paling dekat dengan penelitian ini mengkaji satu sampai tiga parameter: waktu dan tekanan injeksi [8], waktu penekanan [9], temperatur dan waktu injeksi [11], temperatur injeksi, waktu pendinginan, dan komposisi bahan [17], serta tekanan injeksi, tekanan penahanan, dan temperatur nosel [20]. Studi-studi tersebut berbeda dalam respons (massa, cacat, penolakan, waktu siklus), sehingga pernyataan bahwa studi terdahulu hanya menguji dua atau tiga faktor hanya berlaku untuk kelompok studi ini dan tidak dibuktikan terhadap seluruh literatur. Penelitian ini mengkaji empat faktor temperatur dan waktu (temperatur pemanasan, temperatur pendinginan, waktu injeksi, dan waktu pendinginan), yang dikaitkan dengan pengisian dan pembekuan lelehan [2], [6], pada tiga level dengan matriks $L9(3^4)$. Tekanan dan kecepatan injeksi dipertahankan tetap, tetapi nilainya tidak dicatat, dan alasan pemilihan keempat faktor tidak didokumentasikan secara formal. Volume dalam penelitian ini dihitung dari massa dengan densitas tetap, sehingga setara dengan pengukuran massa dan tidak dianggap lebih representatif daripada massa; volume dipakai agar hasil dapat dibandingkan dengan nilai target $89,63 \text{ cm}^3$. Tujuan penelitian adalah menentukan kombinasi parameter yang diprediksi optimal, bukan membuktikan konsistensi volume; kombinasi tersebut belum dikonfirmasi eksperimen.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat eksperimental kuantitatif dan memakai desain eksperimen Taguchi untuk menilai pengaruh empat parameter proses *injection moulding* terhadap volume gantungan pakaian polipropilena. Tahapannya mencakup penyiapan bahan dan alat, penyusunan rancangan eksperimen, pelaksanaan injeksi, pengumpulan data, serta analisis secara manual dan dengan Minitab.

2.1 Bahan Penelitian

Bahan baku yang dipakai adalah pelet polipropilena (PP), seperti terlihat pada Gambar 1. PP dipilih karena termoplastik ini lazim dipakai untuk gantungan pakaian: ringan, cukup kaku, tahan kelembaban, dan titik lelehnya sesuai dengan kemampuan mesin injeksi yang digunakan. Grade PP, indeks leleh, dan pemasok tidak dicatat.



Gambar 1. Pelet Polipropilena sebagai Bahan Baku

2.2 Alat Penelitian

Penelitian dilaksanakan menggunakan satu unit mesin injection moulding beserta mold (cetakan) berukuran total 400 mm × 350 mm × 250 mm dengan massa material cetakan sekitar 195,577 kg, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Mold dirancang khusus untuk mencetak gantungan pakaian dengan geometri standar. Merek dan spesifikasi mesin, jumlah rongga (cavity), tekanan dan kecepatan injeksi, tekanan dan waktu penahanan (holding), serta ketelitian timbangan tidak dicatat.



Gambar 2. Mold (Cetakan) yang Digunakan pada Proses Injection Moulding

2.3 Rancangan Eksperimen Taguchi

Empat parameter proses (faktor) diuji, masing-masing pada tiga level: temperatur pemanasan (A) 200, 250, dan 300 °C; temperatur pendinginan (B) 10, 15, dan 20 °C; waktu injeksi (C) 10, 14, dan 18 detik; serta waktu pendinginan (D) 15, 20, dan 25 detik. Keempat faktor ditempatkan pada matriks ortogonal standar Taguchi L9(3⁴) seperti pada Tabel 1, dan setiap baris eksperimen direplikasi tiga kali untuk mengestimasi variasi (*noise*).

Tabel 1. Matriks Ortogonal L9(3⁴) Rancangan Eksperimen

Eksperimen	Temperatur Pemanasan (A)	Temperatur Pendinginan (B)	Waktu Injeksi (C)	Waktu Pendinginan (D)
1	200 °C	10 °C	10 detik	15 detik
2	200 °C	15 °C	14 detik	20 detik
3	200 °C	20 °C	18 detik	25 detik
4	250 °C	10 °C	14 detik	20 detik
5	250 °C	15 °C	18 detik	15 detik
6	250 °C	20 °C	10 detik	20 detik
7	300 °C	10 °C	18 detik	20 detik
8	300 °C	15 °C	10 detik	25 detik
9	300 °C	20 °C	14 detik	15 detik

2.4 Prosedur Penelitian

Pelaksanaan eksperimen dilakukan melalui tahapan: (1) pemasangan mold pada mesin injection moulding; (2) pengaturan parameter proses sesuai kombinasi level pada Tabel 1; (3) injeksi pelet polipropilena ke dalam rongga cetakan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3; (4) pengambilan produk setelah waktu pendinginan tercapai; dan (5) penimbangan massa setiap produk dengan timbangan digital, yang dikonversi menjadi volume berdasarkan densitas polipropilena. Nilai densitas tetap yang dipakai tidak dicatat. Setiap kombinasi diulang tiga kali. Urutan eksperimen (pengacakan), stabilisasi mesin sebelum pengambilan data, dan apakah tiga replikasi berasal dari siklus independen atau dari beberapa produk dalam satu siklus tidak dicatat.

Bila replikasi berasal dari satu siklus, replikasi tersebut merupakan sub-sampel, bukan replikasi independen, sehingga galat replikasi cenderung terlalu kecil dan nilai p pada analisis data mentah (Bagian 3.7) terlalu optimistis.



Gambar 3. Proses Injeksi Polipropilena ke dalam Mold

2.5 Teknik Analisis Data

Data hasil eksperimen dianalisis melalui lima tahapan berikut. Pertama, data massa hasil penimbangan dikonversi menjadi volume sebagaimana Persamaan (1),

$$M = V \times \rho \quad (1)$$

dengan M adalah massa produk (gram), V adalah volume produk (cm³), dan ρ adalah densitas polipropilena (g/cm³) yang dianggap tetap. Karena ρ tetap, volume berbanding lurus dengan massa; tidak ada pengukuran volume atau densitas aktual yang independen. Kedua, volume ditransformasikan ke dalam rasio signal to noise (S/N) dengan kriteria smaller the better menggunakan Persamaan (2),

$$S/N = -10 \log_{10} [(1/n) \sum y_i^2] \quad (2)$$

dengan n adalah jumlah replikasi dan $y_i = |V_i - V_{\text{target}}|$ adalah selisih volume replikasi ke-i terhadap target $V_{\text{target}} = 89,63 \text{ cm}^3$. Nilai target ini diperoleh dari penyesuaian balik terhadap Tabel 3, karena dasar penetapannya tidak didokumentasikan. Seluruh volume terukur berada di bawah target, sehingga S/N yang lebih besar berarti rata-rata volume lebih dekat ke target; S/N ini tidak mengukur keseragaman volume semata-mata (Bagian 3.2). Ketiga, dilakukan perhitungan jumlah kuadrat (Sum of Square/SS) pada Persamaan (3), keempat, perhitungan rata-rata kuadrat (Mean of Square/MS) pada Persamaan (4), dan kelima, perhitungan persentase kontribusi masing-masing faktor terhadap variasi total pada Persamaan (5).

$$SS = \sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \times n \quad (3)$$

$$MS = SS / V \quad (4)$$

$$\rho (\%) = (SS' / SST) \times 100\% \quad (5)$$

dengan V adalah derajat kebebasan faktor, SS' adalah jumlah kuadrat murni faktor setelah dikurangi kontribusi galat, dan SST adalah jumlah kuadrat total. ANOVA memakai sembilan nilai S/N (satu per baris eksperimen), sehingga derajat kebebasan galat awal nol; untuk memperoleh galat, faktor dengan SS terkecil digabung (pooling up) ke galat sesuai prosedur analisis varians Taguchi [7]. Pemilihan faktor yang digabung ditentukan oleh SS terkecil dan tidak membuktikan bahwa faktor tersebut tidak berpengaruh. Kriteria signifikansi adalah $p < \alpha = 0,10$. Sebagai analisis pelengkap, 27 pengamatan volume mentah dianalisis dengan ANOVA empat faktor

dengan galat replikasi (derajat kebebasan 18). Seluruh perhitungan manual dibandingkan dengan keluaran Minitab untuk memeriksa konsistensi perhitungan; kesesuaian tersebut tidak membuktikan ketepatan rancangan, pengukuran, atau model statistik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memaparkan data eksperimen, hasil transformasi ke rasio *signal to noise*, analisis varians, persentase kontribusi, dan pemeriksaan dengan Minitab, disertai interpretasi teknis serta perbandingan dengan penelitian terdahulu.

3.1 Data Hasil Eksperimen

Setiap kombinasi parameter pada matriks ortogonal L9(3⁴) dijalankan dengan tiga replikasi. Massa produk hasil penimbangan diubah menjadi volume dengan Persamaan (1), dan hasilnya (cm³) untuk tiap eksperimen dan replikasi tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Volume Produk (cm³)

Eksperimen	A	B	C	D	Replikasi 1 (cm ³)	Replikasi 2 (cm ³)	Replikasi 3 (cm ³)
1	200°C	10°C	10 dtk	15 dtk	80,18	81,85	80,48
2	200°C	15°C	14 dtk	20 dtk	70,54	77,11	77,36
3	200°C	20°C	18 dtk	25 dtk	77,64	77,20	75,79
4	250°C	10°C	14 dtk	20 dtk	79,09	79,33	78,17
5	250°C	15°C	18 dtk	15 dtk	88,45	81,45	87,58
6	250°C	20°C	10 dtk	20 dtk	85,91	83,93	82,52
7	300°C	10°C	18 dtk	20 dtk	83,94	83,83	80,50
8	300°C	15°C	10 dtk	25 dtk	84,69	83,92	83,64
9	300°C	20°C	14 dtk	15 dtk	81,96	84,03	83,11

Volume produk pada Tabel 2 berkisar antara 70,54 cm³ dan 88,45 cm³. Rentang ini menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang berbeda menghasilkan tingkat kepenuhan pengisian cetakan yang berbeda, sehingga diperlukan analisis lanjutan untuk menentukan faktor yang paling berpengaruh.

3.2 Perhitungan Rasio Signal to Noise (S/N)

Data volume pada Tabel 2 ditransformasikan ke dalam rasio S/N menggunakan Persamaan (2) dengan kriteria smaller the better, pada selisih volume terhadap target 89,63 cm³. Hasil perhitungan rasio S/N untuk setiap eksperimen disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rasio Signal to Noise (S/N) Setiap Eksperimen

Eksperimen	A	B	C	D	Rasio S/N (dB)
1	1	1	1	1	-18,9126
2	1	2	2	2	-23,5007
3	1	3	3	3	-22,1291
4	2	1	2	3	-20,6510
5	2	2	3	1	-13,8326
6	2	3	1	2	-15,0911
7	3	1	3	2	-16,9715
8	3	2	1	3	-14,9084
9	3	3	2	1	-16,4575

Rata-rata rasio S/N dari seluruh eksperimen diperoleh sebesar -18,0505 dB (grand mean). Seluruh volume terukur (70,54–88,45 cm³) berada di bawah target 89,63 cm³, sehingga rata-rata kuadrat selisih terutama ditentukan oleh jarak rata-rata volume dari target (kuadrat bias menyumbang 59,9–99,8% pada kesembilan eksperimen), bukan oleh sebaran antarreplikasi. Eksperimen 5, misalnya, memiliki simpangan baku replikasi tinggi (3,82 cm³) tetapi S/N tertinggi

(-13,83 dB) karena rata-rata volumenya (85,83 cm³) paling dekat ke target. Akibatnya, S/N pada penelitian ini mengukur kedekatan volume terhadap target, bukan konsistensi (keseragaman) volume, dan kombinasi optimum cenderung sama dengan kombinasi yang memaksimalkan rata-rata volume.

3.3 Respon Rasio S/N terhadap Volume Produk

Pengaruh tiap level faktor ditelaah lewat rata-rata rasio S/N pada setiap level, seperti terlihat pada Tabel 4. Semakin besar selisih (delta) antara level tertinggi dan terendah suatu faktor, semakin besar pula pengaruh faktor itu terhadap volume produk.

Tabel 4. Respon Rasio S/N terhadap Volume Produk

	A	B	C	D
Level 1	-21,51	-18,85	-16,30	-16,40
Level 2	-16,52	-17,41	-20,20	-18,52
Level 3	-16,11	-17,89	-17,64	-19,23
Selisih (Delta)	5,40	1,43	3,90	2,83
Peringkat	1	4	2	3

Menurut Tabel 4, faktor A (temperatur pemanasan) berada di peringkat pertama dengan delta terbesar, 5,40, disusul faktor C (waktu injeksi) 3,90, faktor D (waktu pendinginan) 2,83, dan faktor B (temperatur pendinginan) dengan delta terkecil, 1,43. Urutan ini menunjukkan bahwa temperatur pemanasan adalah parameter yang paling dominan terhadap volume gantungan pakaian. Level dengan rata-rata S/N tertinggi pada tiap faktor, yang dipilih sebagai kondisi optimum menurut kriteria *smaller the better*, adalah temperatur pemanasan 300 °C (A3), temperatur pendinginan 15 °C (B2), waktu injeksi 10 detik (C1), dan waktu pendinginan 15 detik (D1). Kombinasi ini tidak ada di antara sembilan eksperimen, sehingga statusnya prediksi. Berdasarkan model aditif dengan faktor B digabung ke galat, S/N prediksi sekitar -12,72 dB (lebih baik daripada seluruh eksperimen; yang terbaik -13,83 dB), dan rata-rata volume prediksi dari analisis data mentah sekitar 87,0 cm³. Keduanya belum dikonfirmasi lewat eksperimen.

3.4 Analisis Varians dan Pooling Up

Analisis varians (ANOVA) dilakukan pada sembilan nilai S/N (Tabel 3) menggunakan Persamaan (3) dan (4). Hasil perhitungan jumlah kuadrat (SS) dan rata-rata kuadrat (MS) sebelum penggabungan faktor disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Analisis Varians Sebelum Pooling Up

Sumber	Derajat Kebebasan (V)	Sum of Square (SS)	Mean of Square (MS)
A	2	54,24105	27,12052
B	2	3,18449	1,59224
C	2	23,54556	11,77278
D	2	12,99788	6,49894
Error	0	—	—
Total	8	93,96898	

Karena ANOVA memakai sembilan nilai S/N, derajat kebebasan galat awal bernilai nol (Tabel 5). Untuk memperoleh galat, faktor B (SS terkecil) digabung ke galat (pooling up); hasilnya disajikan pada Tabel 6. Pemilihan B sebagai galat didasarkan pada SS terkecil dan tidak dengan sendirinya membuktikan bahwa B tidak berpengaruh; dukungan tambahan dari data mentah disajikan pada Bagian 3.7.

Tabel 6. Analisis Varians Setelah Pooling Up

Sumber	V	SS	MS	F hitung
A	2	54,24105	27,12052	17,03288
B	Pooling up			
C	2	23,54556	11,77278	7,39382

D	2	12,99788	6,49894	4,08162
Error	2	3,18449	1,59224	
Total	8	93,96898		

Pada $\alpha = 0,10$, faktor A memiliki F hitung 17,03 dengan $p = 0,055$, sehingga signifikan menurut model ini (tolak H_0). Faktor C ($F = 7,39$; $p = 0,119$) dan D ($F = 4,08$; $p = 0,197$) memiliki p di atas 0,10 dan tidak signifikan pada ANOVA S/N. Keduanya tetap dicantumkan dengan kontribusinya karena peringkat kontribusi bukan uji signifikansi, tetapi pernyataan bahwa C dan D berpengaruh tidak didukung oleh uji ini. Dengan derajat kebebasan galat hanya 2, uji ini berdaya rendah.

3.5 Persentase Kontribusi Setiap Faktor

Persentase kontribusi tiap faktor terhadap variasi total volume dihitung dengan Persamaan (5), dengan hasil pada Tabel 7.

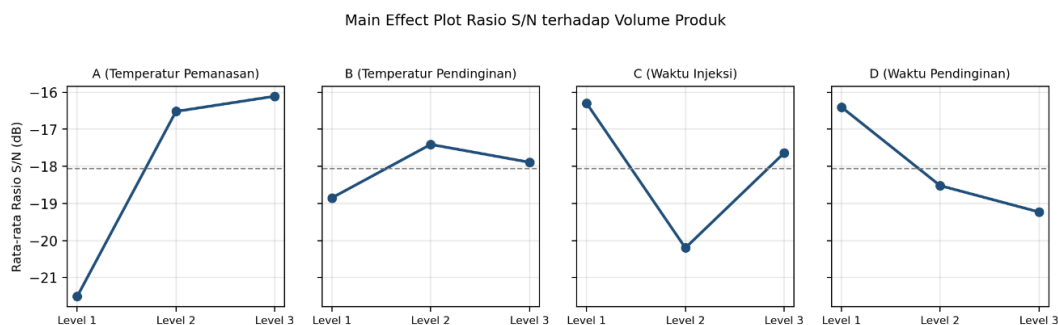
Tabel 7. Persentase Kontribusi Setiap Faktor

Sumber	V	SS	MS	SS'	ρ (%)
A	2	54,24105	27,12052	51,05657	54,33
B	Pooling				
C	2	23,54556	11,77278	20,36108	21,67
D	2	12,99788	6,49894	9,81340	10,44
Error	2	3,18449	1,59224		13,56
Total	8	93,96898			100

Tabel 7 menunjukkan kontribusi temperatur pemanasan (A) 54,33%, waktu injeksi (C) 21,67%, dan waktu pendinginan (D) 10,44%, dengan galat 13,56%. Persentase kontribusi menyatakan porsi variasi S/N yang dijelaskan faktor dan tidak identik dengan signifikansi statistik: C dan D berkontribusi 21,67% dan 10,44% tetapi memiliki $p > 0,10$. Faktor B yang digabung ke galat tidak diberi kontribusi tersendiri. Temperatur leleh juga dikaji pada [4]; perbandingan dengan studi tersebut disajikan pada Bagian 3.8. Penjelasan bahwa temperatur lebih tinggi menurunkan viskositas lelehan adalah mekanisme umum yang tidak diuji pada penelitian ini.

3.6 Pemeriksaan Konsistensi Perhitungan Menggunakan Minitab

Data juga diolah dengan Minitab untuk memeriksa perhitungan manual. Keluaran Minitab (Seq SS, Adj SS, Adj MS, F, dan p) identik dengan Tabel 5, 6, dan 7 (faktor A: $F = 17,03$; $p = 0,055$; faktor C: $F = 7,39$; $p = 0,119$; faktor D: $F = 4,08$; $p = 0,197$). Kesesuaian ini menunjukkan bahwa pengolahan data konsisten antara kedua cara, tetapi tidak membuktikan ketepatan rancangan eksperimen, pengukuran, atau model statistik. Gambar 4 menampilkan main effects plot rasio S/N; faktor A memiliki kemiringan garis paling curam dibandingkan faktor B, C, dan D.



Gambar 4. Main Effect Plot Rasio S/N terhadap Volume Produk Gantungan Pakaian

3.7 Analisis Pelengkap pada 27 Data Mentah

Karena ANOVA S/N hanya memakai sembilan nilai dengan galat dari hasil pooling, 27 pengamatan volume mentah dianalisis dengan ANOVA empat faktor. Matriks L9 jenuh (delapan derajat kebebasan faktor dari delapan derajat kebebasan antar-eksperimen), sehingga galat sepenuhnya adalah galat replikasi di dalam eksperimen (derajat kebebasan 18; SS = 79,415; MS = 4,412), seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. ANOVA 27 Data Mentah Volume Produk

Sumber	V	SS	MS	F hitung	p
A	2	184,826	92,413	20,95	< 0,001
B	2	3,097	1,548	0,35	0,709
C	2	77,823	38,912	8,82	0,002
D	2	54,271	27,135	6,15	0,009
Galat	18	79,415	4,412		
Total	26	399,432			

Pada analisis ini, faktor A ($F = 20,95$; $p < 0,001$), C ($F = 8,82$; $p = 0,002$), dan D ($F = 6,15$; $p = 0,009$) signifikan pada $\alpha = 0,10$, sedangkan B tidak ($F = 0,35$; $p = 0,709$). Kontribusi terhadap variasi total volume (SS/SST) berturut-turut 46,3%, 19,5%, 13,6%, dan 0,8%, dengan galat replikasi 19,9%. Hasil ini mendukung pooling faktor B, tetapi berbeda dari ANOVA S/N yang menyatakan C dan D tidak signifikan; perbedaan tersebut wajar karena kedua analisis memakai respons yang berbeda (sembilan nilai S/N dibandingkan 27 volume mentah) dan derajat kebebasan galat yang berbeda (2 dibandingkan 18). Peringkat $A > C > D$ sama pada kedua analisis. Nilai p pada Tabel 8 benar hanya bila tiga replikasi merupakan siklus independen yang diacak; bila beberapa produk berasal dari satu siklus, galat terlalu kecil dan nilai p terlalu optimistis.

3.8 Pembahasan

Hasil menunjukkan bahwa, di antara empat parameter yang dikaji pada rentang level yang diuji, temperatur pemanasan paling besar kontribusinya terhadap kedekatan volume terhadap target, dan merupakan satu-satunya faktor yang signifikan pada ANOVA S/N. Secara umum, peningkatan temperatur menurunkan viskositas lelehan dan memudahkan pengisian rongga sebelum membeku [6]; mekanisme ini tidak diuji di sini karena tidak ada pengukuran viskositas, tekanan rongga, atau pemeriksaan under-fill dan rongga udara (void). Karena seluruh volume berada di bawah target dan S/N mengukur kedekatan terhadap target, hasil ini lebih tepat dibaca sebagai temperatur pemanasan yang lebih tinggi menghasilkan volume rata-rata yang lebih besar (77,6; 82,9; dan 83,3 cm³ pada 200, 250, dan 300 °C), bukan volume yang lebih seragam. Selisih rata-rata antara 250 °C dan 300 °C (0,35 cm³) jauh lebih kecil daripada simpangan baku galat replikasi (2,1 cm³), sehingga keunggulan 300 °C atas 250 °C belum diuji dan tidak dapat dibedakan pada data ini. Trotta dkk. [4] melaporkan bahwa massa komponen meningkat seiring kenaikan temperatur leleh dan tekanan penahanan pada micro injection moulding material POM; arahnya sejalan dengan hasil ini, tetapi material, skala, dan rentang parameternya berbeda.

Waktu injeksi dan waktu pendinginan menempati peringkat kedua dan ketiga berdasarkan kontribusi pada ANOVA S/N, tetapi tidak signifikan pada analisis tersebut ($p = 0,119$ dan $0,197$); pada analisis data mentah keduanya signifikan. Penjelasan teknis yang umum (waktu injeksi terlalu singkat dapat membuat pengisian belum lengkap sebelum gerbang membeku, dan waktu pendinginan menentukan pembekuan sebelum produk dikeluarkan) tidak diuji pada penelitian ini. Temperatur pendinginan memiliki kontribusi terkecil pada rentang 10–20 °C dan tidak signifikan pada kedua analisis ($p = 0,709$ pada data mentah). Kesimpulan tentang parameter B terbatas pada estimasi setelah pooling dan rentang level yang diuji; hasil ini belum cukup untuk menyatakan bahwa B dapat ditoleransi lebih longgar, yang memerlukan pengujian tambahan.

Kombinasi A3B2C1D1 (300 °C, 15 °C, 10 detik, dan 15 detik) merupakan prediksi optimum menurut model aditif; kombinasi ini tidak termasuk dalam sembilan eksperimen dan

belum dikonfirmasi, sehingga penggunaannya sebagai pengaturan awal memerlukan eksperimen konfirmasi pada kondisi produksi. Keterbatasan lain: tekanan dan kecepatan injeksi tidak divariasikan, sedangkan parameter proses lain juga dapat memengaruhi massa dan densitas produk [5]; volume diturunkan dari massa dengan densitas tetap; target 89,63 cm³ ditetapkan tanpa dokumentasi; sifat replikasi tidak dicatat; dan interaksi antarfaktor tidak dapat diestimasi pada L9 dengan empat faktor.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengolahan data dan pembahasan di atas, penelitian ini menghasilkan kesimpulan berikut.

1. Pada ANOVA S/N (sembilan nilai S/N, faktor B digabung ke galat), temperatur pemanasan (A) memberi kontribusi terbesar (54,33%) dan merupakan satu-satunya faktor yang signifikan pada $\alpha = 0,10$ ($p = 0,055$).
2. Waktu injeksi (C, 21,67%) dan waktu pendinginan (D, 10,44%) menempati peringkat kedua dan ketiga berdasarkan kontribusi, tetapi tidak signifikan pada ANOVA S/N ($p = 0,119$ dan $0,197$); pada analisis 27 data mentah keduanya signifikan ($p = 0,002$ dan $0,009$). Temperatur pendinginan (B) tidak signifikan pada kedua analisis; kesimpulan tentang B terbatas pada estimasi setelah pooling dan rentang level yang diuji.
3. Kombinasi 300 °C, 15 °C, 10 detik, dan 15 detik merupakan prediksi optimum (kedekatan volume terhadap target 89,63 cm³) yang belum dikonfirmasi eksperimen; penelitian ini tidak menunjukkan bahwa konsistensi volume telah tercapai.
4. Kesesuaian hasil manual dan Minitab menunjukkan konsistensi pengolahan data, bukan ketepatan rancangan, pengukuran, atau model statistik. Volume diturunkan dari massa dengan densitas tetap, sehingga hasil berlaku pada kondisi yang diuji.

5. SARAN

Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa saran diajukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Lakukan eksperimen konfirmasi pada kombinasi optimum prediksi dengan replikasi independen dan pengacakan, dan bandingkan dengan salah satu kombinasi pada L9 (misalnya eksperimen 5).
2. Libatkan parameter proses tambahan seperti tekanan injeksi, kecepatan injeksi, dan persentase material daur ulang, karena parameter proses lain dapat memengaruhi massa dan densitas produk [5].
3. Bila tujuannya konsistensi volume, gunakan respons yang memisahkan rata-rata dan variasi (misalnya S/N tipe nominal-the-best) dengan pengukuran volume atau densitas yang independen; untuk beberapa karakteristik sekaligus dapat dipakai pendekatan multi-respons seperti Grey Relational Analysis atau Response Surface Methodology [10].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moayyedean, M., Dinc, A., Mamedov, A., 2021, Optimization of injection-molding process for thin-walled polypropylene part using artificial neural network and Taguchi techniques, *Polymers*, vol 13, no 23, p 4158, doi: 10.3390/polym13234158.
-

-
- [2] Kumar, R., Bairwa, K., 2025, Optimizing process parameters in plastic injection molding using the Taguchi method: a focus on minimizing defects and improving product quality, *Evergreen*, vol 12, no 2, pp 1177–1188.
 - [3] Liou, G. Y., Liao, C. H., Chang, J. C., 2023, Optimize injection-molding process parameters and build an adaptive process control system based on nozzle pressure profile and clamping force, *Polymers*, vol 15, no 3, p 610.
 - [4] Trotta, G., Nobile, R., Carbone, S., 2022, Optimizing process parameters in micro injection moulding — influences on shrinkage and part weight, *Polymer Testing*, vol 107, p 107498.
 - [5] Trinh, V. L., 2025, The effect of processing parameters on density and weight during the injection molding process, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol 15, no 3, pp 23105–23110.
 - [6] Chaciński, T., Sutowski, P., 2021, Common defects in injection molding of plastic products and their influence on product quality, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, vol 5, no 1, pp 7–14.
 - [7] Hamzaçebi, C., 2021, Taguchi method as a robust design tool, dalam Li, P., Pereira, P., Navas, H. V. (eds.), *Quality Control – Intelligent Manufacturing, Robust Design and Charts*, IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.94908.
 - [8] Serfandi, D. N., Fahmiy, M. I., Hidayati, A. N., Prayogo, D. S., Sulistyono, 2025, Analisis perubahan waktu dan tekanan injeksi terhadap massa dan kualitas produk pada proses injection moulding, *Jurnal Mekanik Terapan*, vol 6, no 3, pp 143–148.
 - [9] Muchyidin, A., Susilo, S., Nurzaman, M., Setiawan, E., 2020, Pengaruh waktu penekanan pada proses injection molding terhadap kualitas anting dagu helm proyek, *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, vol 7, no 1, pp 67–76.
 - [10] Hidayat, T. P., Sugioko, A., Williana, C., 2020, Penentuan setting optimal mesin injection moulding menggunakan metode response surface, *Metris: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol 25, no 1, pp 25–32.
 - [11] Susilo, S. H., Pebrianti, D., Faizal, E., 2024, The effect of temperature and injection time on the injection molding process on the final weight of the mini tray product, *Asian Journal of Science and Engineering*, vol 3, no 1, pp 172–182.
 - [12] Siswoyo, E. A., Mas'ud, M., 2022, Analisa parameter mesin injection molding terhadap cacat produk handle grip menggunakan metode Taguchi, *Journal Mechanical and Manufacture Technology*, vol 3, no 2, pp 78–90.
 - [13] Intan, S. N., Supriyadi, E., 2024, Perancangan perbaikan kualitas produk menggunakan metode Taguchi, *Sistemik: Jurnal Ilmiah Nasional Bidang Ilmu Teknik*, vol 12, no 1, pp 77–81.
 - [14] Handono, M. T., Hernadewita, 2026, Injection molding parameter optimization using Taguchi and Moldflow, *Eduvest – Journal of Universal Studies*, vol 6, no 6, pp 6938–6948.
 - [15] Rahman, F., Wiro Kurniawan, B., Pramestiani, I., Rinanto, N., 2023, Optimizing injection molding parameters to cycle time of bioring cone cup products with Taguchi method, *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol 8, no 3, pp 494–500.
 - [16] Halimah, P., Ekawati, Y., 2020, Penerapan metode Taguchi untuk meningkatkan kualitas bata ringan pada UD. XY Malang, *Journal of Industrial Engineering and Management Systems*, vol 13, no 1, pp 13–26.
 - [17] Bisono, F., Ramadhan, R., Indrawan, R., Purnomo, D. A., 2025, Pengaruh temperatur injeksi, waktu pendinginan dan komposisi bahan baku pada injection molding terhadap cacat produk, *Jurnal Teknik Mesin dan Pembelajaran*, vol 8, no 1.
 - [18] Ramadhan, R., Bisono, F., 2024, Optimasi parameter injection molding menggunakan metode Taguchi, *Jurnal Teknik Mesin dan Industri*, vol 1, no 1, pp 1–10.
-

- [19] Kusuma, F. A., Khoiroh, S. M., 2026, Quality control of plastic pallet products using the Taguchi method to reduce product rejection: a case study on the Sound 1800 machine, *Jurnal Ilmiah Teknik*, vol 5, no 2, pp 456–472.
- [20] Fadlillah, S. F., Hardjito, A., 2025, Pengaruh injection pressure, holding pressure, dan nozzle temperature terhadap cacat flash pada proses injection molding produk tutup kemasan roll on bahan polypropylene dengan metode Taguchi, *Jurnal Teknik Industri*, vol 2, no 2, pp 118–125.
- [21] Aji, A. A., Badia, B. A., Putra, M. I., Putra, F. C., Sahputra, W. P., Darwis, M., Simanjuntak, R. A. H., 2025, Optimasi parameter pembubutan baja AISI 1045 menggunakan metode Taguchi, *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol 11, no 2, pp 247–257, doi: 10.35308/jmkn.v11i2.13719.
- [22] Aji, A. A., Putra, F. C., Badia, B. A., Putra, M. I., Sahputra, W. P., Darwis, M., Simanjuntak, R. A. H., 2025, Analysis of the effect of machining variables on surface roughness and vibration amplitude in turning AISi 1045 steel using the Taguchi method, *PHENOMENON: Multidisciplinary Journal of Sciences and Research*, vol 3, no 1, pp 53–62, doi: 10.62668/phenomenon.v3i1.1406.
- [23] Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [24] Roy, R. K., 2010, *A Primer on the Taguchi Method*, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.
- [25] Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y., 2005, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, Hoboken.
- [26] Tsui, K.-L., 1992, An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design, *IIE Transactions*, vol 24, no 5, pp 44–57.
- [27] Montgomery, D. C., 2017, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., John Wiley & Sons, Hoboken.
- [28] Asiri, M. H., Husen, M., Badia, B. A., & Syafrun, M., "Studi Kekuatan Sambungan Las Terhadap Material Baja TRS 500 Menggunakan Variasi Gerakan Elektroda," *Jurnal Polimesin*, vol. 18, no. 2, pp. 82-90, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1828>
- [29] Badia, B. A., Asiri, M. H., & Husen, M., "Analisa Variasi Gerakan Elektroda pada Hasil Las Bahan Baja Karbon Rendah (ST37) Terhadap Sifat Mekanik," *Jurnal Po-limesin*, vol. 19, no. 1, pp. 53-60, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i1.1912>.
- [30] Badia, B. A., Sudia, B., Mangalla, L. K., Gunawan, Y., Aksar, P., Samhuddin, S., Putra, M. I., Larobu, F. E., Darwin, D., Efendi, R., Defi, S., Gamsir, L. O. A., & Darwis, M., "Analisis Pengaruh Komposisi Perekat Terhadap Karakteristik Termal Briket Arang Pelepah Sagu Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 38-44, 2024. [Online]. Avail-able: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i1.9208>
- [31] Nuryanti, N., Erdani, Y., Subekti, R., Purnomo, W., Indrajaya, N., & Badia, B. A., "Tracking Solar Panel Maximum Power Point Using IoT-Based Mamdani Fuzzy Log-ic Control," *Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 5, pp. 703-710, 2025. [Online]. Availa-ble: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i5.7709>
- [32] Aji, A. A., Cesar Putra, F., Badia, B. A., Idris Putra, M., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Hasudungan Simanjuntak, R. A. (2025). Analysis Of The Effect Of Machining Variables On Surface Roughness and Vibration Amplitude in Turning AISi 1045 Steel Using The Taguchi Method. *PHENOMENON : Multidisciplinary Journal Of Sciences and Research*, 3(01), 53–62. <https://doi.org/10.62668/phenomenon.v3i1.1406>
- [33] W. P. Sahputra, B. A. Badia, M. I. Putra, F. C. Putra, and A. A. Aji, "Rekayasa Pros-es Ekstraksi dan Pengelolaan Biji Nikel: Teknologi, Tantangan, Dan Prospek Masa Depan", *Kapalamada*, vol. 4, no. 02, pp. 243–255, Jun. 2025.
-

- [34] Y. Erdani, R. A. Pratama, B. A. Badia, and G. I. Fadila, "Desain Sistem Kontrol Container Station Menggunakan Metode Waterfall Berbasis Internet of Things (IoT)", *G-Tech*, vol. 8, no. 3, pp. 1415–1430, Jul. 2024.
 - [35] F. E. Larobu, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. M. F. Rachim, "Rancang Bangun PLTMH Skala Kecil Dengan Sistem On-Grid Untuk Respons Dinamis Terhadap Perubahan Beban Listrik", *Kapalamada*, vol. 4, no. 01, pp. 07–18, Mar. 2025.
 - [36] A. Kadir and B. A. Badia, "Rancang Bangun Belt Konveyor Rotary Untuk Pengangkutan Pasir", *Kapalamada*, vol. 4, no. 04, pp. 755–766, Dec. 2025.
 - [37] Badia, B. A., Delly, J., Ardiansal, M., & Rahmatullah, P., "Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Pengiris Bawang Merah Otomatis Berbasis Motor Listrik untuk Meningkatkan Produktivitas UMKM", *Jurnal Teknologi Terapan (JTT)*, vol. 12, no. 1, pp. 84-94, 2026. <https://doi.org/10.31884/jtt.v12i1.1294>
 - [38] S. Defi, L. Pagiling, M. N. A. Nur, F. E. Larobu, A. Jalil, and B. A. Badia, "Rancang bangun prototipe sistem kontrol automatic main failure (AMF) menggunakan SMS (Short Message Service) berbasis PLC (Programmable Logic Controller)," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 75–87, 2024. doi: <https://doi.org/10.12345/jmekanova.v10i1.75-87>
 - [39] R. Efendi, D. Darwin, B. A. Badia, A. Tando, H. Herlina, and W. L. Padang, "Rancang bangun termokopel data logger berbasis Arduino Mega 2560 skala laboratorium," *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 15–19, 2023. doi: <https://doi.org/10.33333/machine.v9i2.15-19>.
 - [40] F. C. Putra, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. A. Gamsir, "Pengaruh Cross Feed dan Ukuran Grit Silicon Carbide Wheel Grinder Terhadap Respon Getaran dan Kekasaran Permukaan Untuk Material Baja (Hardened Tool Steel) OCR12VM," *J. Mekan. Inov. Teknol.*, vol. 10, no. 1, pp. 343-354, Apr. 2024, doi: 10.35308/jmkn.v10i1.9385.
-