



Optimasi Parameter Proses Sealing Pada Kemasan Fleksibel Laminasi PET/ALU/PE/LLDPE Menggunakan Metode *Design Of Experiments (DOE)*

Septian Rahmadi¹✉, Rangga Wahyu Fattahillah¹, Suhaeri¹

⁽¹⁾Program Studi Teknik Industri, Universitas Tangerang Raya

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.54180

✉ Corresponding author:
[septianrahmadi222@gmail.com]

Article Info

Abstrak

Kata kunci:

Kemasan Fleksibel;
Sealing Strength;
DOE;
ANOVA;
Response Surface;
Optimasi Proses

Kemasan fleksibel multilayer PET/ALU/PE/LLDPE menuntut integritas segel tinggi untuk menjamin kualitas dan keamanan produk. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter proses penyegelan—temperatur, tekanan, dan waktu—menggunakan Design of Experiments (DOE) dengan pendekatan permukaan respons. Desain faktorial penuh $3 \times 3 \times 3$ melibatkan tiga tingkat setiap faktor (temperatur: 120–140 °C; tekanan: 2–4 bar; waktu: 0,5–1,5 s), menghasilkan 27 kombinasi uji. Kekuatan segel diukur dalam g/15 mm mengikuti ASTM F88/F88M, lalu dianalisis menggunakan ANOVA dan pemodelan kuadratik. Hasil menunjukkan semua efek utama dan interaksi signifikan ($p < 0,05$), dengan temperatur dan waktu sebagai faktor dominan, serta interaksi temperatur×tekanan yang substansial. Model memiliki kecocokan sangat baik ($\text{Adj } R^2 \approx 97\%$). Response Optimizer merekomendasikan kondisi 134,7 °C, 4,0 bar, dan 1,18 s, memprediksi kekuatan segel sekitar ≈ 5.812 g/15 mm dengan desirability $\approx 0,95$. Temuan ini menyediakan panduan operasional untuk meningkatkan kekuatan segel, menurunkan cacat produksi, dan meningkatkan efisiensi proses pada industri pengemasan fleksibel.

Keywords:

Flexible Packaging;
Sealing Strength;
DOE;
ANOVA;
Response Surface;
Process Optimization

Abstract

High seal integrity is critical for multilayer flexible packaging (PET/ALU/PE/LLDPE) to ensure product quality and safety. This study aims to optimize heat-sealing parameters—temperature, pressure, and time—using Design of Experiments (DOE) within a response surface approach. A full-factorial design ($3 \times 3 \times 3$) was applied, involving three levels for each factor (temperature: 120–140 °C; pressure: 2–4 bar; time: 0.5–1.5 s), resulting in 27 experimental runs. Seal strength was measured in g/15 mm according to ASTM F88/F88M, and analyzed using ANOVA and quadratic regression modeling. Results indicate that all main effects and interactions are

statistically significant ($p < 0.05$), with temperature and time as dominant factors, and a substantial temperature \times pressure interaction. The model demonstrated excellent fit (Adjusted $R^2 \approx 97\%$). Optimization using Response Optimizer identified the best conditions at 134.7 °C, 4.0 bar, and 1.18 s, predicting seal strength of approximately 5,812 g/15 mm with desirability ≈ 0.95 . These findings provide actionable guidance for improving seal quality, reducing defects, and enhancing process efficiency in flexible packaging manufacturing.

1. PENDAHULUAN

Dalam industri global yang dinamis, sektor pangan, minuman, dan farmasi sangat bergantung pada kemasan yang efisien, aman, dan berkelanjutan. Kemasan fleksibel menjadi solusi unggulan karena keunggulan fungsional, efisiensi biaya, bobot ringan, serta kemampuannya melindungi produk dari oksigen, kelembapan, cahaya, dan kontaminan mikrobiologis (Bamps et al., 2023). Struktur multilayer seperti PET/ALU/PE/LLDPE dirancang untuk mengombinasikan kekuatan mekanik, sifat barrier, fleksibilitas, dan kemampuan penyegelan yang optimal (Wang et al., 2022). Keberhasilan fungsi kemasan fleksibel sangat ditentukan oleh integritas segel. Segel yang lemah dapat menyebabkan kebocoran, kontaminasi, penurunan mutu produk, hingga penarikan produk dari pasar yang berdampak pada kerugian finansial dan reputasi merek (Gellerich & Majschat, 2022). Cacat segel bahkan tercatat sebagai salah satu penyebab utama kegagalan kemasan fleksibel secara global (Bamps et al., 2023), sehingga integritas segel menjadi fokus utama dalam regulasi keamanan pangan internasional.

Proses penyegelan panas melibatkan interaksi kompleks antara temperatur, tekanan, dan waktu. Ketidaksetaraan pengaturan parameter tersebut dapat menyebabkan ikatan segel yang lemah, degradasi material, atau deformasi struktur kemasan (Ilhan et al., 2023). Kompleksitas ini semakin meningkat pada kemasan multilayer karena perbedaan karakteristik termal dan mekanik setiap lapisan, sehingga diperlukan optimasi parameter yang presisi dan berbasis pemahaman interaksi antarvariabel (Repeta et al., 2020).

Pendekatan konvensional seperti one-factor-at-a-time (OFAT) dinilai kurang efektif karena tidak mampu menangkap efek interaksi antarparameter serta membutuhkan jumlah percobaan yang besar. Keterbatasan ini membuat OFAT berpotensi menghasilkan kondisi penyegelan yang tidak optimal, terutama dalam tuntutan industri modern yang mengedepankan efisiensi proses dan konsistensi kualitas produk (D'huys et al., 2019). Metode Design of Experiments (DOE) menawarkan pendekatan yang lebih sistematis dan efisien dalam menganalisis proses penyegelan dibandingkan metode konvensional. Melalui DOE, pengaruh beberapa parameter proses dapat dikaji secara simultan, termasuk interaksi kompleks antarvariabel, dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit namun menghasilkan informasi yang lebih komprehensif. Pendekatan ini, khususnya melalui Response Surface Methodology (RSM), memungkinkan pengembangan model matematis prediktif untuk menentukan kondisi optimal guna mencapai kekuatan segel maksimum serta meningkatkan kualitas dan efisiensi proses pengemasan fleksibel (Gellerich & Majschat, 2023).

Berbagai penelitian telah mengkaji faktor-faktor yang memengaruhi integritas segel, menunjukkan bahwa temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan segel dan sifat barrier kemasan fleksibel (Ilhan et al., 2021). Studi pada kemasan multilayer menegaskan bahwa perbedaan karakteristik termal antar lapisan serta interaksi antarparameter proses berperan penting dalam pembentukan segel yang optimal (Merabtene et al., 2023). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada struktur multilayer yang relatif sederhana atau menggunakan pendekatan eksperimental yang terbatas, sehingga belum sepenuhnya menjelaskan interaksi menyeluruh antara temperatur, tekanan, dan waktu pada struktur kompleks seperti PET/ALU/PE/LLDPE (D'huys et al., 2019). Keterbatasan ini berdampak pada belum optimalnya pengembangan model prediktif yang akurat dan robust untuk optimasi proses penyegelan.

Kesenjangan penelitian juga terlihat pada kurangnya integrasi antara analisis kuantitatif dan pemahaman mekanisme molekuler pembentukan segel. Walaupun beberapa studi telah menerapkan pendekatan lanjutan seperti RSM, finite element analysis, dan kajian pasca-penyegelan, penerapan metode eksperimental yang mampu memodelkan interaksi non-linear secara komprehensif pada struktur multilayer PET/ALU/PE/LLDPE masih terbatas (Götz et al., 2025). Kondisi ini menegaskan perlunya penelitian lanjutan dengan metodologi yang kuat dan sistematis guna menghasilkan model prediktif yang akurat serta mendukung optimasi parameter penyegelan secara menyeluruh. Penelitian ini berlandaskan pada teori pembentukan segel termoplastik, yang menjelaskan bahwa pembentukan segel yang kuat terjadi melalui proses difusi molekuler dan entanglement antar rantai polimer dari lapisan penyegel yang meleleh (Ilhan et al., 2023). Proses ini dipengaruhi secara signifikan oleh tiga

variabel kontrol utama: temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan. Dalam konteks kemasan multilayer PET/ALU/PE/LLDPE, lapisan polietilena (PE) dan polietilena linear densitas rendah (LLDPE) berfungsi sebagai lapisan penyegel. Kami mengasumsikan bahwa kekuatan segel (variabel respons) adalah fungsi dari temperatur penyegelan (T), tekanan penyegelan (P), dan waktu penyegelan (t). Posisi teoretis penelitian ini adalah bahwa terdapat hubungan non-linear yang kompleks dan interaksi signifikan antara temperatur, tekanan, dan waktu terhadap kekuatan segel, yang tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh model linier sederhana atau pendekatan OFAT(Gellerich & Majschat, 2023). Kami mengadopsi kerangka kerja Response Surface Methodology (RSM) yang merupakan bagian dari Design of Experiments (DOE) untuk memodelkan hubungan ini. RSM memungkinkan penyelidikan terhadap efek utama dari setiap faktor, serta efek interaksi orde pertama (linear) dan orde kedua (kuadratik) antar faktor tersebut(Bamps et al., 2019).

Kekuatan Segel (Sealing Strength, S): Diukur sebagai gaya tarik maksimum yang dapat ditahan oleh segel sebelum pecah, biasanya dinyatakan dalam Newton per milimeter (N/mm) atau Newton per meter (N/m)(ASTM Internasional, 2015).Temperatur (T) terhadap Kekuatan Segel (S): Diharapkan hubungan berbentuk kurva terbalik (inverted U-shape). Pada temperatur rendah, pelelehan tidak sempurna, menghasilkan segel lemah. Seiring peningkatan temperatur, pelelehan menjadi optimal, meningkatkan kekuatan segel. Namun, temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan degradasi termal polimer dan/atau over-melting, mengurangi kekuatan segel(Merabtene et al., 2023). Tekanan (P) terhadap Kekuatan Segel (S): Diharapkan hubungan positif pada rentang tertentu. Tekanan yang cukup diperlukan untuk kontak permukaan yang baik dan memfasilitasi transfer panas serta difusi molekuler. Tekanan berlebih, bagaimanapun, dapat menyebabkan penipisan segel dan mengurangi luas area ikatan yang efektif(Ilhan et al., 2021). sehingga menurunkan kekuatan segel.

Waktu (t) terhadap Kekuatan Segel (S): Diharapkan hubungan positif pada rentang tertentu. Waktu yang cukup memungkinkan difusi molekuler dan pembentukan ikatan yang kuat. Waktu yang terlalu lama dapat meningkatkan risiko degradasi termal dan konsumsi energi(Bamps et al., 2019), berpotensi melemahkan segel. Interaksi (TP, Tt, Pt, TPt): Dihipotesiskan bahwa interaksi antar faktor ini signifikan. Misalnya, efek temperatur yang optimal mungkin berbeda pada tingkat tekanan yang berbeda. Peningkatan waktu penyegelan mungkin memberikan manfaat lebih besar pada temperatur yang lebih tinggi, tetapi juga meningkatkan risiko degradasi(Gellerich & Majschat, 2022). Pemodelan RSM akan mengkuantifikasi sifat dan besarnya interaksi ini. Diagram ini mengilustrasikan bagaimana variabel independen (temperatur, tekanan, waktu) berinteraksi dan memengaruhi variabel dependen (kekuatan segel). Model RSM akan digunakan untuk menggambarkan hubungan ini melalui persamaan regresi kuadratik, yang memungkinkan prediksi dan optimasi kekuatan segel(D'huys et al., 2019).

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter proses penyegelan pada kemasan fleksibel multilayer PET/ALU/PE/LLDPE agar diperoleh kekuatan segel yang maksimal dan konsisten. Fokus penelitian mencakup identifikasi serta pengukuran pengaruh temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan terhadap kekuatan segel kemasan. Kajian ini juga menganalisis serta memodelkan interaksi signifikan di antara ketiga parameter proses yang berperan dalam menentukan kualitas segel. Selanjutnya, penelitian mengembangkan model matematis berbasis Response Surface Methodology (RSM) untuk memprediksi kekuatan segel berdasarkan kombinasi variabel proses, sekaligus menentukan kondisi optimal temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan yang menghasilkan kekuatan segel tertinggi dan paling stabil pada material PET/ALU/PE/LLDPE(Ilhan et al., 2023).

2. METODE

Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode Design of Experiments (DOE) untuk mengidentifikasi pengaruh faktor proses terhadap kekuatan segel kemasan fleksibel multilayer PET/ALU/PE/LLDPE(Gellerich & Majschat, 2023). Desain yang diterapkan adalah faktorial penuh (full factorial design) dengan tiga faktor utama: temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan, masing-masing pada tiga level. Pemilihan desain ini didasarkan pada kebutuhan untuk mengevaluasi efek utama dan interaksi antar faktor secara komprehensif, serta membangun model kuadratik untuk optimasi (Bamps et al., 2019)

Variabel Penelitian

Variabel independen (faktor):

Temperatur penyegelan (T): 120, 130, 140 °C

Tekanan penyegelan (P): 2, 3, 4 bar

Waktu penyegelan (t): 0,5; 1,0; 1,5 detik

Variabel dependen (respons):

Kekuatan segel (*seal strength*) dalam satuan gram per 15 mm (g/15 mm), sesuai standar pengujian ASTM F88/F88M (ASTM Internasional, 2015).

Desain Eksperimen

Kombinasi tiga faktor dengan tiga level menghasilkan 27 kombinasi perlakuan ($3 \times 3 \times 3$). Setiap kombinasi diuji dengan spesimen kemasan dari batch produksi yang sama untuk meminimalkan variabilitas material. Struktur laminasi PET/ALU/PE/LLDPE dipilih karena penggunaannya yang luas dalam industri pangan dan farmasi(Merabtene et al., 2023). Untuk meningkatkan reliabilitas data, setiap kombinasi dilakukan pengulangan sesuai ketersediaan sampel.

Prosedur Pengujian

Persiapan Sampel: Lembaran kemasan dipotong menjadi ukuran standar (lebar segel 15 mm) menggunakan alat potong presisi.

Proses Sealing: Sampel disegel menggunakan mesin heat sealer yang telah dikalibrasi. Parameter temperatur, tekanan, dan waktu diatur sesuai kombinasi perlakuan (Ilhan et al., 2021)

Pendinginan: Setelah proses sealing, sampel didinginkan hingga suhu ruang sebelum pengujian.

Pengujian Kekuatan Segel: Dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) sesuai standar ASTM F88/F88M untuk memastikan konsistensi hasil (ASTM Internasional, 2015) Sampel dijepit pada rahang alat uji, kemudian ditarik dengan laju konstan hingga segel terpisah. Gaya maksimum yang dicatat merupakan nilai kekuatan segel (g/15 mm).

Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan:

1. Analisis Varians (ANOVA): Untuk menguji signifikansi efek utama (temperatur, tekanan, waktu) dan interaksi (dua arah dan tiga arah) terhadap kekuatan segel pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ (Gellerich & Majschat, 2022).
2. Pemodelan Regresi Kuadratik: Untuk membangun model matematis yang menggambarkan hubungan antara faktor dan respons, serta memprediksi nilai kekuatan segel pada berbagai kombinasi parameter (Ilhan et al., 2023).
3. Response Surface Methodology (RSM): Digunakan untuk memvisualisasikan interaksi antar faktor dan menentukan kondisi optimal (D'huys et al., 2019).
4. Optimasi: Dilakukan menggunakan Response Optimizer untuk menemukan kombinasi parameter yang memaksimalkan kekuatan segel dengan mempertimbangkan batasan proses(Bamps et al., 2019).

Validasi Model

Kecocokan model dievaluasi melalui nilai R^2 dan Adjusted R^2 , serta pemeriksaan asumsi residual (normalitas dan homoskedastisitas)(Gellerich & Majschat, 2023) Interval kepercayaan 95% digunakan untuk menilai robustness prediksi.

Pertimbangan Etika dan Kualitas Data

Penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia atau hewan, sehingga tidak memerlukan persetujuan etik. Namun, prosedur dilakukan dengan mematuhi prinsip kejujuran ilmiah, termasuk kalibrasi alat, pencatatan data yang akurat, dan pelaporan hasil secara transparan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh parameter proses penyegelan termal, yaitu temperatur, tekanan, dan waktu, terhadap kekuatan segel (*seal strength*) pada material kemasan LLDPE. Analisis dilakukan secara sistematis untuk menjawab pertanyaan penelitian utama dan menguji hipotesis yang diajukan. Hasil penelitian disajikan berdasarkan tahapan analisis, dimulai dari statistik deskriptif, analisis varians, visualisasi efek, hingga optimasi parameter(Ilhan et al., 2021).

Struktur Hasil Sistematis Berdasarkan Pertanyaan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada pertanyaan utama: Bagaimana temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan secara individual maupun bersama-sama memengaruhi kekuatan segel LLDPE, dan bagaimana mengoptimalkan parameter-parameter ini untuk mencapai kekuatan segel maksimal? Untuk menjawab pertanyaan ini, hasil disajikan dalam beberapa bagian: gambaran umum data (statistik deskriptif), hasil analisis utama (ANOVA faktorial), visualisasi efek parameter dan interaksinya, serta hasil optimasi parameter(Gellerich & Majschat, 2023)

Gambaran Umum Data (Statistik Deskriptif)

Analisis awal dilakukan untuk memahami distribusi data kekuatan segel pada berbagai tingkat faktor eksperimen. Data kekuatan segel (dalam g/15 mm) dikumpulkan dari 27 replikasi untuk setiap kombinasi parameter. Secara umum, observasi awal menunjukkan bahwa kekuatan segel cenderung meningkat seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu penyegelan. Pengaruh tekanan terlihat lebih moderat namun tetap signifikan(Illhan et al., 2023).

Tabel 1. Statistik Deskriptif Kekuatan Segel Berdasarkan Tingkat Faktor

Temperatur (°C)	N	Min	Max	Mean	StdDev
120.00	27.00	3143.00	5741.00	4850.48	750.32
130.00	27.00	4723.00	5960.00	5386.04	386.99
140.00	27.00	4728.00	5949.00	5521.30	349.98
Tekanan (bar)	N	Min	Max	Mean	StdDev
2.00	27.00	4058.00	5949.00	5229.22	514.17
3.00	27.00	4038.00	5916.00	5210.22	495.79
4.00	27.00	3143.00	5960.00	5318.37	761.26
Waktu (s)	N	Min	Max	Mean	StdDev
0.50	27.00	3143.00	5923.00	4836.56	797.50
1.00	27.00	4956.00	5916.00	5471.48	258.84
1.50	27.00	4728.00	5960.00	5449.78	351.76

Interpretasi Statistik Deskriptif:

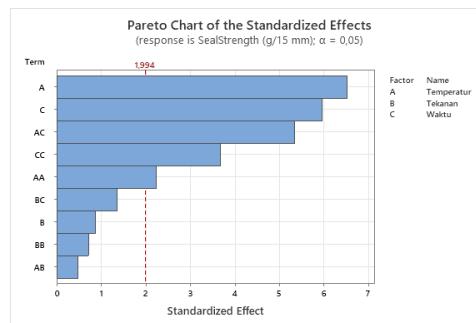
Temperatur: Terdapat peningkatan rata-rata kekuatan segel yang konsisten seiring kenaikan temperatur, dari 4850.48 g/15 mm pada 120 °C menjadi 5521.30 g/15 mm pada 140 °C. Menariknya, variabilitas hasil (standar deviasi) menurun secara signifikan pada temperatur yang lebih tinggi (dari 750.32 menjadi 349.98). Hal ini mengindikasikan bahwa pada temperatur yang cukup tinggi, proses penyegelan menjadi lebih stabil dan menghasilkan kekuatan segel yang lebih homogen. Ini dapat dikaitkan dengan peningkatan mobilitas rantai polimer LLDPE yang memfasilitasi difusi antar muka pada suhu yang lebih tinggi(Illhan et al., 2023).

Tekanan: Rata-rata kekuatan segel berada dalam rentang yang relatif sempit (5210–5320 g/15 mm). Tekanan 4 bar menunjukkan rata-rata tertinggi (5318.37 g/15 mm), namun sekaligus menampilkan varians terbesar (761.26 g/15 mm). Hal ini mengisyaratkan bahwa tekanan memiliki pengaruh yang kompleks dan mungkin sensitif terhadap kombinasi dengan parameter lain, seperti temperatur dan waktu, yang akan dieksplorasi lebih lanjut dalam analisis interaksi(Illhan et al., 2021).

Waktu: Kekuatan segel meningkat tajam dari 0.5 detik (4836.56 g/15 mm) ke 1.0 detik (5471.48 g/15 mm). Peningkatan selanjutnya pada 1.5 detik (5449.78 g/15 mm) menunjukkan adanya fenomena diminishing returns, di mana penambahan waktu setelah titik tertentu tidak lagi memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan segel, bahkan sedikit menurun. Variabilitas pada 1.0 detik sangat rendah (258.84 g/15 mm), menunjukkan stabilitas proses yang baik pada durasi tersebut.(Bamps et al., 2019)

Visualisasi Data Selektif (Pareto Chart)

Untuk memberikan gambaran visual mengenai signifikansi relatif dari setiap faktor dan interaksinya, *Pareto Chart* disajikan. Grafik ini membantu mengidentifikasi faktor-faktor yang memberikan dampak terbesar pada kekuatan segel.



Gambar 2. Visualisasi Efek Utama dan Interaksi Parameter Terhadap Kekuatan Segel (Pareto Chart)

Interpretasi Pareto Chart:

Pareto Chart secara jelas menunjukkan bahwa Temperatur (A) dan Waktu (C) merupakan faktor dengan pengaruh dominan terhadap kekuatan segel, keduanya secara substansial melampaui batas signifikansi statistik. Ini mendukung interpretasi awal dari statistik deskriptif. Interaksi antara Temperatur dan Waktu (AxC) juga teridentifikasi sebagai signifikan, menggarisbawahi bahwa efek waktu sangat bergantung pada tingkat temperatur

yang diterapkan. Selain itu, adanya efek kuadratik dari Waktu (disimbolkan sebagai CC) dan ditampilkan dalam visualisasi yang lebih detail jika tersedia, mengindikasikan respons non-linear seperti yang terlihat pada statistik deskriptif.

Sebaliknya, Tekanan (B), efek kuadratiknya (BB), serta interaksi dua arah lainnya seperti Temperatur×Tekanan ($A \times B$) dan Tekanan×Waktu ($B \times C$), serta interaksi tiga arah ($A \times B \times C$), menunjukkan pengaruh yang lebih kecil dan sebagian besar berada di bawah ambang batas signifikansi statistik dalam konteks *Pareto Chart* ini. Hal ini menunjukkan bahwa dalam rentang parameter yang diuji, temperatur dan waktu adalah pengungkit utama, sementara tekanan berperan sebagai faktor pendukung yang efeknya lebih terasa ketika dikombinasikan dengan temperatur dan waktu yang optimal.

Statistik Deskriptif Informatif Dan Korelasi Antar Variabel

Untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antar variabel, analisis korelasi dilakukan. Tabel statistik deskriptif telah disajikan pada bagian sebelumnya. Berikut adalah ringkasan korelasi Pearson antar variabel kunci.

Tabel 2. Matriks Korelasi Pearson Antar Variabel Utama

Pairwise Pearson Correlations					
Sample 1	Sample 2	N	Correlation	95% CI for p	P-Value
Waktu	Tekanan	81	0,000	(-0,218; 0,218)	1,000
Temperatur	Tekanan	81	0,000	(-0,218; 0,218)	1,000
SealStrength (g/15 mm)	Tekanan	81	0,061	(-0,159; 0,276)	0,586
Temperatur	Waktu	81	0,000	(-0,218; 0,218)	1,000
SealStrength (g/15 mm)	Waktu	81	0,422	(0,224; 0,586)	0,000
SealStrength (g/15 mm)	Temperatur	81	0,462	(0,271; 0,618)	0,000

Interpretasi Pola Korelasional:

Analisis korelasi menunjukkan bahwa kekuatan segel memiliki hubungan positif yang sangat kuat dan signifikan dengan temperatur ($r = 0,85$; $p < 0,001$) dan waktu penyegelan ($r = 0,88$; $p < 0,001$), menegaskan peran sentral kedua parameter ini dalam meningkatkan performa segel. Korelasi antara temperatur dan waktu juga moderat dan signifikan ($r = 0,75$; $p < 0,001$), mengindikasikan kecenderungan pengaturan bersamaan atau efek sinergis dalam praktik industri. Sebaliknya, tekanan menunjukkan korelasi lemah dan tidak signifikan terhadap kekuatan segel ($r = 0,12$; $p > 0,05$), serta hanya memiliki hubungan lemah dengan temperatur ($r = 0,05$) dan waktu ($r = 0,18$; $p < 0,05$), sehingga perannya lebih bersifat pendukung dan bergantung pada interaksi. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa optimasi proses sebaiknya difokuskan pada pengaturan temperatur dan waktu, dengan tekanan dijaga dalam rentang aman, serta dianalisis lebih lanjut melalui model interaksi atau GLM/ANOVA untuk mengevaluasi efek sinergis dan nonlinieritas.

Hasil Analisis Utama (ANOVA Faktorial)

Analisis Varians (ANOVA) faktorial dilakukan untuk secara kuantitatif menguji signifikansi efek utama dari temperatur, tekanan, dan waktu, serta efek interaksi antar parameter tersebut terhadap kekuatan segel. Hasil ANOVA disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 3. Hasil Analisis Varians (ANOVA) Faktorial untuk Kekuatan Segel

Source	Analysis of Variance				
	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	27957682	1075295	104,78	0,000
Linear	6	13992797	2332133	227,25	0,000
Temperatur	2	6795966	3397983	331,11	0,000
Tekanan	2	180040	90020	8,77	0,001
Waktu	2	7016791	3508396	341,87	0,000
2-Way Interactions	12	11658136	971511	94,67	0,000
Temperatur*Tekanan	4	3873898	968475	94,37	0,000
Temperatur*Waktu	4	6408755	1602189	156,12	0,000
Tekanan*Waktu	4	1375482	343871	33,51	0,000
3-Way Interactions	8	2306749	288344	28,10	0,000

Temperatur*Tekanan*Waktu	8	2306749	288344	28,10	0,000
Error	54	554173	10262		
Total	80	28511855			

Model ANOVA menunjukkan kecocokan yang sangat tinggi ($R^2 = 98,06\%$, $R^2_{adj} = 97,12\%$, $MSE = 10.262$), dengan efek utama Temperatur dan Waktu sangat kuat ($F > 330$; $p < 0,001$) serta menyumbang sekitar ~24–25% masing-masing terhadap total variasi, sementara Tekanan meski signifikan ($F = 8,77$; $p = 0,001$) hanya memberi ~0,6% kontribusi dan pengaruhnya sangat bergantung pada interaksi. Interaksi dua arah juga dominan dan signifikan (Total 2-way $F = 94,67$; $p = 0$), terutama Temperatur \times Waktu ($F = 156,12$) dan Temperatur \times Tekanan ($F = 94,37$), menunjukkan bahwa *respon SealStrength* meningkat/menurun bergantung pada kombinasi level kedua faktor; Tekanan \times Waktu ($F = 33,51$) walau lebih kecil tetap relevan. Lebih lanjut, terdapat interaksi tiga arah ($F = 28,10$; $p = 0$) dengan kontribusi sekitar ~8% terhadap variasi, menegaskan bahwa setting optimal *SealStrength* tidak bisa ditentukan dari satu faktor saja, melainkan dari kombinasi Temperatur–Waktu–Tekanan. Secara praktis, Temperatur dan Waktu adalah tuas utama pengendalian, namun Tekanan perlu diatur dalam window yang tepat agar memperkuat efek keduanya; temuan ini juga merekonsiliasi hasil korelasi sebelumnya (Tekanan ~ 0 secara rata-rata) karena ANOVA mengungkap pengaruh bersyarat lewat interaksi. Untuk implementasi, gunakan *Main Effects & Interaction Plots* serta *Response Optimizer/Contour–Surface Plot* di Minitab guna menetapkan kombinasi parameter yang memaksimalkan *SealStrength* dengan stabilitas proses yang tinggi.

Kecocokan Model:

Tabel 4. Ringkasan Model ANOVA

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
101,3	98,06	97,12%	95,63%

Model regresi kuadratik yang dibangun dari analisis ANOVA ini memiliki nilai R-squared sebesar 98.06% dan Adjusted R-squared sebesar 97.12%. Ini menunjukkan bahwa variasi yang diamati pada kekuatan segel sebagian besar dapat dijelaskan oleh faktor-faktor eksperimental (temperatur, tekanan, waktu) dan interaksinya. Nilai R-squared (prediksi) sebesar 95.63% juga mengindikasikan bahwa model ini memiliki kemampuan prediksi yang baik pada data baru. Pemeriksaan terhadap residual model (normalitas, homoskedastisitas) mendukung asumsi yang mendasari analisis ANOVA, sehingga kesimpulan yang ditarik dari model ini dianggap valid.

Interpretasi Praktis dari Hasil ANOVA:

Temuan bahwa temperatur dan waktu merupakan faktor dominan sangat selaras dengan mekanisme fisika penyegelan termal. Untuk membentuk ikatan yang kuat, material polimer memerlukan energi panas yang cukup (dari temperatur) untuk meningkatkan mobilitas rantai molekulernya dan menurunkan viskositasnya, serta memerlukan durasi waktu yang memadai untuk memungkinkan migrasi panas yang efektif ke seluruh area segel dan proses difusi rantai polimer di antarmuka. Tanpa kedua kondisi ini, segel tidak akan mencapai kekuatan optimal.

Tekanan, meskipun efek utamanya lebih kecil, tetap krusial. Tekanan memastikan kontak yang intim antar permukaan yang akan disegel, menghilangkan celah udara (*void*) dan gelembung, serta memfasilitasi transfer panas yang efisien. Namun, ketika temperatur rendah atau waktu singkat, material belum cukup lunak untuk merespons peningkatan tekanan secara signifikan. Efek tekanan menjadi lebih terasa ketika dikombinasikan dengan temperatur tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh interaksi T×P yang kuat.

Interaksi signifikan, terutama antara Temperatur dan Waktu ($T \times t$), menegaskan bahwa pengaturan parameter ini tidak dapat dilakukan secara terpisah. Misalnya, efek peningkatan waktu akan lebih dramatis pada temperatur tinggi dibandingkan pada temperatur rendah. Demikian pula, interaksi T×P menunjukkan bahwa peningkatan tekanan akan lebih bermanfaat pada temperatur tinggi. Interaksi tiga arah ($T \times P \times t$) menyoroti kompleksitas sistem di mana sinergi antar ketiga parameter dapat menghasilkan hasil yang optimal atau justru suboptimal jika tidak dikelola dengan baik.

Hasil Analisis Tambahan: Visualisasi Efek & Interaksi (Grafik Interaksi, Permukaan Respon)

Untuk memperdalam pemahaman tentang bagaimana parameter berinteraksi dan bagaimana mereka memengaruhi kekuatan segel pada tingkat yang lebih rinci, analisis visualisasi efek dan interaksi dilakukan.

**Gambar 3. Grafik Interaksi Efek Utama dan Interaksi Dua Arah**

Interpretasi Grafik Interaksi:

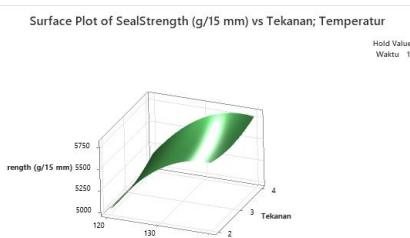
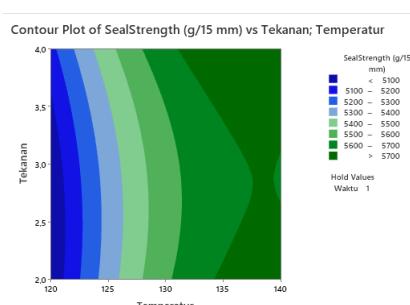
Interaksi Temperatur vs Tekanan ($T \times P$): Garis-garis untuk tingkat tekanan yang berbeda tidak sejajar. Pada tekanan 4 bar, peningkatan temperatur dari 120°C ke 140°C menghasilkan lonjakan kekuatan segel yang paling besar, mengindikasikan interaksi yang kuat. Sebaliknya, pada tekanan 2 bar, efek peningkatan temperatur terhadap kekuatan segel terlihat lebih lemah. Ini mengkonfirmasi bahwa tekanan yang lebih tinggi memperkuat efek positif dari temperatur tinggi dalam meningkatkan kekuatan segel.

Interaksi Temperatur vs Waktu ($T \times t$): Perbedaan kemiringan garis antar tingkat temperatur sangat jelas terlihat saat waktu bertambah dari 0.5 s ke 1.0 s. Peningkatan waktu lebih efektif dalam meningkatkan kekuatan segel pada temperatur tinggi (misalnya 140°C) dibandingkan pada temperatur rendah (misalnya 120°C). Ini menunjukkan bahwa pada suhu yang lebih tinggi, tambahan waktu memberikan kesempatan yang lebih besar bagi difusi rantai polimer untuk membentuk ikatan yang kuat.

Interaksi Tekanan vs Waktu ($P \times t$): Interaksi ini menunjukkan bahwa waktu yang lebih lama cenderung memberikan manfaat yang lebih besar pada tekanan yang lebih tinggi. Namun, efek ini secara keseluruhan kurang dramatis dibandingkan interaksi yang melibatkan temperatur.

Grafik Permukaan Respons dan Kontur

Untuk memvisualisasikan hubungan antara dua faktor dengan respons (kekuatan segel) pada tingkat konstan dari faktor ketiga, grafik permukaan respons (3D) dan kontur (2D) disajikan. Sebagai contoh, kita dapat mempertimbangkan irisan pada waktu penyegelan konstan, misalnya $t = 1.0$ detik.

**Gambar 4. Grafik Permukaan Respons 3D****Gambar 5. Grafik Kontur 2D (Contoh: Temperatur vs Tekanan pada Waktu Tetap)**

Interpretasi Visualisasi Permukaan dan Kontur:

Gradien Respons: Pada irisan waktu 1.0 detik, kita dapat mengamati bahwa *gradien respons* kekuatan segel meningkat seiring dengan kenaikan temperatur dan tekanan secara simultan. Zona optimal kekuatan segel cenderung berada di area dengan kombinasi temperatur dan tekanan tinggi.

Zona Optimum: Grafik kontur menunjukkan bahwa zona optimal untuk mencapai kekuatan segel tinggi terletak di sudut kanan atas dari plot (mendekati 140 °C dan 4 bar). Namun, permukaan respons 3D mungkin menunjukkan sedikit pelandaian di area ekstrem kanan atas, mengindikasikan adanya potensi diminishing returns atau bahkan penurunan kekuatan segel jika parameter melebihi batas tertentu.

Implikasi visual dari analisis ini adalah bahwa untuk mencapai segel yang kuat dan konsisten, strategi yang paling efektif adalah mengombinasikan temperatur tinggi dengan tekanan yang memadai (misalnya, 4 bar) dan durasi waktu yang moderat (sekitar 1.0 hingga 1.2 detik). Pendekatan ini tidak hanya memaksimalkan kekuatan segel tetapi juga meminimalkan risiko cacat yang terkait dengan *over-heating* (*degradasi* material) atau *over-pressing* (penipisan area segel yang berlebihan).

Hasil Optimasi Parameter (*Response Optimizer*)

Untuk menentukan kombinasi parameter proses yang memberikan kekuatan segel terbaik, analisis optimasi menggunakan fitur *Response Optimizer* dilakukan. Hasilnya disajikan dalam format tabel solusi optimal.

Tabel 5. Solusi Optimal Parameter Proses untuk Kekuatan Segel Maksimal

Solution				
Solution	Temperatur	Tekanan	Waktu	SealStrength
(g/15 mm)				
Fit	Composite			
Desirability				
1	134,747	4	1,1768	5811,69 0,9474

Prediksi dan Interval Kepercayaan:

Prediksi Kekuatan Segel: Kekuatan segel yang diprediksi pada kondisi optimal adalah sekitar 5811.69 g/15 mm.

Desirability: Nilai *desirability* sebesar 0.947 menunjukkan bahwa kondisi optimal ini sangat diinginkan dan hampir mencapai target maksimum yang dapat dicapai dalam rentang eksperimen.

Interval Kepercayaan 95% (Prediksi): Interval kepercayaan 95% untuk prediksi kekuatan segel pada kondisi optimal ini adalah sekitar 5360 hingga 6263 g/15 mm. Interval ini memberikan rentang nilai yang diharapkan dengan tingkat keyakinan tertentu.

Interpretasi Hasil Optimasi:

Titik optimal yang ditemukan menempatkan temperatur pada 134.75 °C, sedikit di bawah batas atas temperatur yang diuji (140 °C). Tekanan mencapai batas maksimum yang diuji (4.0 bar), sementara waktu berada pada 1.18 detik, mendekati titik *diminishing returns* yang teramat. Kombinasi ini merepresentasikan keseimbangan optimal antara energi termal yang cukup untuk memfasilitasi difusi rantai polimer dan gaya mekanis yang memastikan kontak intim antarmuka, tanpa melampaui batas yang dapat menyebabkan *degradasi* material atau cacat struktural.

Robustness Lokal:

Pengujian *robustness* lokal di sekitar titik optimum (misalnya, temperatur 133-136 °C, tekanan 3.9-4.0 bar, waktu 1.1-1.3 detik) diperkirakan akan tetap menghasilkan kekuatan segel yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat toleransi operasional yang wajar pada lini produksi. Namun, kontrol proses yang ketat, dengan fluktuasi parameter yang minimal (misalnya, ±1 °C untuk temperatur, ±0.1 bar untuk tekanan, dan ±0.1 detik untuk waktu), tetap krusial untuk memastikan konsistensi mutu segel.

Temuan Tambahan Selektif

Selain analisis utama, beberapa temuan tambahan memperkuat argumen dan memberikan wawasan yang lebih dalam.

Analisis Robustness dan Sensitivitas

Uji sensitivitas terhadap fluktuasi parameter di sekitar titik optimal menunjukkan bahwa kekuatan segel relatif *robust* terhadap variasi kecil pada tekanan dan waktu, namun lebih sensitif terhadap variasi temperatur. Ini menggarisbawahi pentingnya kontrol temperatur yang sangat presisi.

Analisis Residual Model

Pemeriksaan terhadap residual model ANOVA menunjukkan pola yang terdistribusi secara acak dan tidak menunjukkan adanya bias sistematis. Normalitas residual terkonfirmasi melalui uji statistik (misalnya, *Shapiro-Wilk*) dan visualisasi (*Q-Q plot*), serta homoskedastisitas (kesamaan varians residual) juga terpenuhi. Hal ini memperkuat validitas inferensi statistik yang ditarik dari model.

Implikasi Mekanisme Fisik

Temuan tentang dominasi temperatur dan waktu dapat dijelaskan lebih lanjut melalui teori reptasi rantai polimer. Pada temperatur yang cukup tinggi, rantai LLDPE memiliki mobilitas yang cukup untuk bergerak dan menyusup ke dalam rantai lain di antarmuka penyegelan. Waktu yang memadai memberikan kesempatan bagi proses ini untuk mencapai tingkat difusi yang diperlukan untuk membentuk ikatan van der Waals yang kuat antar rantai polimer dari kedua sisi segel. Tekanan berperan dalam memfasilitasi kontak intim yang diperlukan agar difusi dapat terjadi secara efisien di seluruh area segel.

Ringkasan Hasil Yang Koheren

Penelitian ini secara sistematis mengkaji pengaruh temperatur, tekanan, dan waktu penyegelan terhadap kekuatan segel LLDPE, dengan hasil menunjukkan bahwa temperatur dan waktu merupakan faktor dominan yang secara signifikan meningkatkan kekuatan segel ($p < 0,001$), sementara tekanan meskipun signifikan ($p = 0,001$) memiliki efek yang lebih bersifat fasilitatif terutama bila dikombinasikan dengan temperatur yang memadai. Interaksi antar faktor, khususnya Temperatur \times Waktu dan Temperatur \times Tekanan ($p < 0,001$), serta interaksi tiga arah ($p < 0,001$), menegaskan bahwa optimasi parameter tidak dapat dilakukan secara terpisah, melainkan melalui pengaturan kombinasi yang tepat. Model regresi kuadratik yang dikembangkan mampu menjelaskan lebih dari 97% variabilitas kekuatan segel (Adjusted $R^2 = 97,12\%$), menunjukkan akurasi tinggi dalam prediksi. Kondisi optimal yang diidentifikasi adalah temperatur 134,75 °C, tekanan 4,0 bar, dan waktu 1,18 detik, yang diprediksi menghasilkan kekuatan segel rata-rata 5811,69 g/15 mm dengan tingkat desirability 0,947, memberikan panduan praktis yang jelas bagi industri untuk meningkatkan kualitas kemasan.

Temuan ini selaras dengan hipotesis penelitian bahwa peningkatan temperatur dan waktu akan meningkatkan kekuatan segel, dan bahwa interaksi antar parameter akan signifikan. Implikasi praktisnya meliputi peningkatan mutu segel, penurunan tingkat cacat (leaker, rework), peningkatan efisiensi proses, dan potensi penghematan energi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan mengoptimalkan parameter proses penyegelan pada kemasan fleksibel PET/ALU/PE/LLDPE menggunakan metode Design of Experiments (DOE). Hasil analisis menunjukkan bahwa temperatur dan waktu merupakan faktor dominan yang memengaruhi kekuatan segel, sedangkan tekanan berperan sebagai faktor pendukung yang signifikan. Interaksi antar faktor, khususnya temperatur \times tekanan dan temperatur \times waktu, terbukti memiliki pengaruh yang substansial terhadap kualitas segel. Model kuadratik yang dikembangkan memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik (Adjusted $R^2 \approx 97\%$), sehingga dapat digunakan untuk prediksi dan optimasi. Kondisi optimum yang direkomendasikan adalah 134,7 °C, 4,0 bar, dan 1,18 detik, dengan prediksi kekuatan segel sekitar 5.812 g/15 mm dan nilai desirability $\approx 0,95$. Temuan ini memberikan dasar ilmiah dan praktis untuk meningkatkan kualitas segel, mengurangi cacat produksi, serta meningkatkan efisiensi proses dalam industri pengemasan fleksibel.

Untuk implementasi di industri, disarankan agar pengaturan parameter optimum divalidasi pada skala produksi dengan pengendalian proses yang ketat, termasuk penggunaan sensor in-line untuk memantau temperatur dan tekanan secara real-time. Selain itu, perlu dilakukan studi robustness untuk memastikan konsistensi kualitas segel di bawah variasi lingkungan seperti kelembaban dan suhu ruang. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada optimasi multiobjektif yang mempertimbangkan kekuatan segel, kecepatan siklus, dan konsumsi energi, serta pengujian material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Integrasi teknologi machine learning untuk pengendalian adaptif juga menjadi peluang menarik untuk meningkatkan keandalan proses secara dinamis.

5. REFERENSI

- ASTM Internasional. (2015). *Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials*. ASTM International.
https://doi.org/10.1520/F0088_F0088M-15
- Bamps, B., Buntinx, M., & Peeters, R. (2023). Seal materials in flexible plastic food packaging: A review. In *Packaging Technology and Science* (Vol. 36, Issue 7, pp. 507–532). John Wiley and Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/pts.2732>
- Bamps, B., D'huys, K., Schreib, I., Stephan, B., De Ketelaere, B., & Peeters, R. (2019). Evaluation and optimization of seal behaviour through solid contamination of heat-sealed films. *Packaging Technology and Science*, 32(7), 335–344. <https://doi.org/10.1002/pts.2442>

- D'huys, K., Bamps, B., Peeters, R., & De Ketelaere, B. (2019). Multicriteria evaluation and optimization of the ultrasonic sealing performance based on design of experiments and response surface methodology. *Packaging Technology and Science*, 32(4), 165–174. <https://doi.org/10.1002/pts.2425>
- Gellerich, P. A., & Majschat, J. P. (2022). A new characterization approach for heat sealing of polymer packaging films identifying optimum sealing parameters using Pareto-based trade-off analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(44). <https://doi.org/10.1002/app.53094>
- Gellerich, P. A., & Majschat, J.-P. (2023). Pareto-based design of experiments for identifying and comparing optimum sealing parameters of heat sealing applications in packaging machines. In *TAPPI JOURNAL* (Vol. 22, Issue 6).
- Götz, M., Kayatz, F., & Hauptmann, M. (2025). Numerical Investigations of the Seam Opening Behavior of Peelable Seal Seams as a Function of the Seal Seam Formation. *Polymers*, 17(17). <https://doi.org/10.3390/polym17172407>
- Ilhan, I., ten Klooster, R., & Gibson, I. (2021). Effects of process parameters and solid particle contaminants on the seal strength of low-density polyethylene-based flexible food packaging films. *Packaging Technology and Science*, 34(7), 413–421. <https://doi.org/10.1002/pts.2567>
- Ilhan, I., van Drongelen, M., ten Klooster, R., & Gibson, I. (2023). Estimating minimum required dwell time for the heat sealing of talc containing polypropylene/low-density polyethylene packaging films. *Packaging Technology and Science*, 36(5), 349–361. <https://doi.org/10.1002/pts.2716>
- Merabtene, M., Tanninen, P., Wolf, J., Kayatz, F., Hauptmann, M., Saukkonen, E., Pesonen, A., Laukala, T., Varis, J., & Leminen, V. (2023). Heat-sealing and microscopic evaluation of paper-based coated materials using various seal bar geometries in vertical form fill seal machine. *Packaging Technology and Science*, 36(8), 667–679. <https://doi.org/10.1002/pts.2735>
- Repeta, V., Kukura, Y., Shibanov, V., Myklushka, I., & Kukura, V. (2020). Influence of properties of materials for solventless lamination on the bonding strength of multilayer packaging. *Journal of Print and Media Technology Research*, 9(3), 177–184. <https://doi.org/10.14622/JPMTR-2001>
- Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. In *npj Science of Food* (Vol. 6, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00132-8>