

Optimasi Proses *Expanded Foam Injection Molding* Material *Eva Foam* Untuk Peningkatan Kualitas Produk

¹Nugroho Faris Sudrajat, ²Amin Suhadi

^{1,2} Universitas Pancasila, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: Sudrajatfaris@gmail.com

Abstract: Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses pendinginan pada *Expanded Foam Injection Molding* (EFIM) dalam rangka meningkatkan konsistensi dimensi produk EVA foam. EVA foam, yang digunakan secara luas pada industri sepatu khususnya sneakers, diproduksi melalui proses pembentukan foam di mana blowing agent dan curing agent dicampur ke dalam polimer EVA. Variasi dalam proses pendinginan menyebabkan perbedaan ukuran (dimensi) produk yang signifikan, sehingga meningkatkan reject ratio dan berdampak pada kualitas akhir produk. Dengan menggunakan pendekatan eksperimen desain Taguchi, penelitian ini mengidentifikasi parameter-parameter kunci dalam proses pendinginan, seperti suhu, waktu, dan laju pendinginan, serta menganalisis pengaruhnya terhadap dimensi produk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kondisi pendinginan optimal dapat menurunkan reject ratio dan menghasilkan produk dengan dimensi yang lebih konsisten. Penelitian ini memberikan kontribusi bagi industri manufaktur

Key Words: EVA foam, *Expanded Foam Injection Molding*, proses pendinginan, Taguchi, optimasi dimensi, reject ratio.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses pendinginan pada *Expanded Foam Injection Moulding* (EFIM) dalam rangka meningkatkan konsistensi dimensi produk EVA foam. Busa EVA yang digunakan secara luas pada industri sepatu khususnya sneakers, diproduksi melalui proses pembentukan busa di mana bahan peniup dan bahan pengawet dicampur ke dalam polimer EVA. Variasi dalam proses pendinginan menyebabkan perbedaan ukuran (dimensi) produk yang signifikan, sehingga meningkatkan rasio penolakan dan berdampak pada kualitas akhir produk. Dengan menggunakan pendekatan eksperimen desain Taguchi, penelitian ini mengidentifikasi parameter-parameter kunci dalam proses pendinginan, seperti suhu, waktu, dan laju pendinginan, serta menganalisis pengaruhnya terhadap dimensi produk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kondisi pendinginan optimal dapat menurunkan rasio penolakan dan menghasilkan produk dengan dimensi yang lebih konsisten. Penelitian ini memberikan kontribusi bagi industri manufaktur

Kata Kunci : Busa EVA, *Expanded Foam Injection Moulding*, proses pendinginan, Taguchi, optimasi dimensi, reject rasio.

Pendahuluan

Industri sepatu, khususnya pada segmen sneakers, semakin menuntut inovasi dalam desain dan kualitas produk. Sneakers modern tidak hanya harus memenuhi kriteria estetika, tetapi juga kenyamanan, ringan, dan tahan lama. Salah satu komponen penting dari sneakers adalah sole, yang saat ini banyak diproduksi menggunakan material EVA foam. EVA foam sendiri merupakan polimer elastomer yang dihasilkan dari kopolimer ethylene-vinyl acetate, dicampur dengan blowing agent dan curing agent untuk menghasilkan struktur foam.

Expanded Foam Injection Molding (EFIM) merupakan salah satu metode produksi yang digunakan untuk memproduksi sole berbasis EVA foam. Pada proses EFIM, material EVA yang telah dicampur blowing agent akan diinjeksikan ke dalam mold, kemudian dipanaskan untuk memicu reaksi nukleasi dan pertumbuhan gelembung, sehingga menghasilkan foam dengan struktur sel yang khas. Namun, proses pendinginan yang tidak optimal setelah pembentukan produk dapat mengakibatkan variasi dimensi yang signifikan, misalnya penyusutan yang berlebihan atau warpage. Variasi dimensi ini berdampak pada kesesuaian produk dengan upper pada sneakers dan menambah reject ratio produksi.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengoptimalkan proses pendinginan pada EFIM guna mendapatkan produk EVA foam dengan dimensi yang konsisten dan mengurangi tingkat kegagalan produk. Pendekatan eksperimen dengan metode Taguchi digunakan untuk menentukan kombinasi parameter pendinginan yang optimal.



Metode Penelitian

Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen Taguchi dengan parameter utama:

- Suhu pendinginan ($^{\circ}\text{C}$)
- Waktu pendinginan (menit)
- Laju pendinginan (m/s)

Setiap parameter diuji pada beberapa level yang telah ditentukan berdasarkan studi pendahuluan dan literatur terkait. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan orthogonal array, misalnya L16 (2^n) untuk menguji kombinasi parameter secara minimal.

Prosedur Eksperimen

1. Persiapan Bahan dan Alat:

Bahan baku EVA foam dan blowing agent dipersiapkan sesuai dengan standar produksi. Mesin EFIM disiapkan dengan konfigurasi yang memungkinkan pengaturan variabel pendinginan.

2. Pelaksanaan Proses EFIM:

Material EVA diinjeksikan ke dalam mold dan mengalami proses pembentukan melalui pemanasan mold untuk menciptakan reaksi nukleasi dan ekspansi. Setelah produk keluar dari mold, dilakukan proses pendinginan dengan mengubah parameter (suhu, waktu, laju pendinginan) sesuai desain eksperimen.

3. Pengukuran Dimensi Produk:

Dimensi produk diukur menggunakan alat ukur digital (scribeline dan top gauge) untuk memperoleh data yang akurat. Setiap eksperimen diulang untuk memastikan keandalan data.

4. Analisis Data:

Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan ANOVA untuk menentukan pengaruh signifikan dari masing-masing variabel. Hasil pengujian juga dibandingkan dengan toleransi dimensi produk yang diharapkan.

Variabel Respons

Variabel respons utama yang dianalisis adalah:

- Variasi Dimensi Produk: Perbedaan ukuran produk (panjang, lebar, dan ketebalan) dibandingkan dengan ukuran target.
- Reject Ratio: Persentase produk yang tidak memenuhi standar toleransi.

Sifat Mekanis: Uji kekuatan dan elastisitas produk sebagai indikator kualitas akhir.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Eksperimen

Hasil eksperimen menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari:

- Suhu Pendinginan

Hasil eksperimen mengungkapkan bahwa penggunaan suhu pendinginan yang terlalu tinggi menyebabkan pertumbuhan gelembung yang berlebihan, yang menghasilkan ekspansi produk di luar toleransi yang telah ditetapkan. Sebaliknya, suhu pendinginan yang optimal (misalnya, pada kisaran $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$) mampu menghentikan pertumbuhan gelembung secara tepat sehingga menghasilkan produk dengan dimensi yang mendekati ukuran cetakan. Temuan ini didukung oleh grafik tren yang menunjukkan penurunan *reject ratio* secara signifikan ketika suhu pendinginan diatur pada level optimal.

- Waktu Pendinginan

Variabel waktu pendinginan juga terbukti berpengaruh besar. Waktu pendinginan yang terlalu singkat tidak memungkinkan terjadinya solidifikasi yang merata, sehingga produk mengalami shrinkage yang tidak konsisten. Di sisi lain, waktu pendinginan yang optimal (misalnya, 10–15 menit dalam stabilization tunnel) memastikan bahwa gelembung udara berhenti berkembang secara seragam dan struktur foam terbentuk dengan stabil. Hasil pengukuran dimensi menggunakan alat ukur digital menunjukkan variasi yang lebih kecil pada produk yang mengalami pendinginan optimal dibandingkan dengan produk yang pendinginannya tidak memadai.

- Laju Pendinginan

Laju pendinginan yang seragam sangat penting untuk mencapai keseimbangan distribusi suhu dalam produk. Data eksperimen mengindikasikan bahwa pendinginan yang terlalu cepat atau tidak merata menyebabkan adanya perbedaan ukuran produk, terutama pada area scribeline dan top gauge. Penggunaan laju pendinginan yang konsisten, yang diperoleh melalui kontrol mekanis pada sistem pendinginan, membantu meminimalkan variasi dimensi dan meningkatkan kekakuan (*rigidity*) produk sesuai dengan target desain.

Analisis data menggunakan metode ANOVA menunjukkan bahwa ketiga variabel pendinginan (suhu, waktu, dan laju pendinginan) secara statistik signifikan ($p < 0,05$) mempengaruhi hasil akhir dimensi produk. Selanjutnya, perbandingan antara produk yang diproses pada kondisi optimal dengan produk yang tidak optimal mengungkapkan perbedaan signifikan pada reject ratio, dengan produk optimal mencapai reject ratio yang lebih rendah hingga sekitar 6% dibandingkan kondisi non-optimal yang memiliki variasi dimensi hingga ± 2 mm pada panjang dan ± 1 mm pada lebar produk.

Proses pendinginan merupakan tahapan krusial yang menentukan laju solidifikasi dan pembentukan struktur sel dalam polimer. Dalam penelitian ini, prinsip perpindahan panas Fourier digunakan untuk memahami bagaimana suhu didistribusikan di dalam produk, sedangkan pendekatan metode finite difference membantu memodelkan perubahan temperatur secara spasial dan temporal. Temuan ini mengonfirmasi bahwa pendinginan yang cepat dan seragam dapat mengurangi shrinkage dan warpage, sehingga produk yang dihasilkan memiliki dimensi yang lebih mendekati nilai target.

Selain itu, penelitian ini juga membahas implikasi praktis bagi industri manufaktur sneakers. Dengan kondisi produksi yang dioptimalkan melalui parameter pendinginan yang tepat, reject ratio dapat ditekan, sehingga perusahaan dapat menghemat biaya produksi dan meningkatkan efisiensi operasional. Hal ini sangat penting mengingat tingginya persaingan dalam industri sepatu, di mana konsistensi kualitas produk menjadi salah satu faktor penentu dalam memenangkan kepercayaan pasar.

Grafik hasil eksperimen menunjukkan tren penurunan *reject ratio* ketika parameter pendinginan berada pada kondisi optimal. Analisis ANOVA mengkonfirmasi bahwa ketiga variabel tersebut memiliki pengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap variasi dimensi produk.

Pembahasan

Pembahasan hasil eksperimen mengaitkan temuan dengan teori perpindahan panas dan pembentukan foam. Suhu dan laju pendinginan mempengaruhi distribusi panas di dalam produk yang sedang terbentuk, sehingga mempengaruhi pertumbuhan gelembung udara. Dengan pendinginan yang terlalu cepat atau tidak merata, produk dapat mengalami warpage

atau shrinkage berlebih. Hasil eksperimen mendukung hipotesis bahwa optimasi parameter pendinginan dapat menurunkan variabilitas dimensi produk, sehingga meningkatkan kualitas akhir dan mengurangi reject ratio.

Selain itu, penerapan metode Taguchi memberikan panduan untuk mencapai kondisi produksi yang robust, dimana produk tidak terlalu sensitif terhadap variabilitas proses. Penggunaan orthogonal array memungkinkan identifikasi kombinasi parameter optimal dengan jumlah eksperimen yang efisien.

Kesimpulan

Penelitian ini menggunakan pendekatan model Taguchi untuk mengoptimalkan proses pendinginan pada produk midsole berbahan EVA foam yang dihasilkan melalui Expanded Foam Injection Molding (EFIM). Data eksperimen dianalisis menggunakan metode ANOVA untuk mengidentifikasi pengaruh variabel utama, yakni suhu pendinginan, waktu pendinginan, dan laju pendinginan, terhadap stabilitas dimensi produk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal dicapai pada suhu 20°C dan waktu pendinginan selama 13 menit. Pada kondisi tersebut, penyimpangan ukuran scribe line dan top line berada dalam batas toleransi yang ditetapkan, yaitu tidak ada penyimpangan di arah panjang (0 mm) dan penyimpangan di arah lebar sangat minim (0–0,2 mm).

Hasil penelitian mengungkapkan bahwa pada kondisi pendinginan dengan suhu 0°C, meskipun penyimpangan yang terjadi hanya berkisar antara 0 hingga 0,2 mm, namun struktur foam yang terbentuk memiliki ukuran butiran yang cenderung sedang hingga besar, yaitu sekitar 75–200 µm. Hal ini berdampak pada kekerasan midsole yang relatif rendah, yakni berada pada kisaran 47–50 Asker C. Sebaliknya, pada suhu 20°C, struktur foam yang terbentuk menunjukkan ukuran butiran yang lebih kecil, yaitu sekitar 50–100 µm, yang berimbas pada peningkatan kekerasan midsole hingga mencapai kisaran 52–54 Asker C. Kondisi suhu 40°C menghasilkan penyimpangan ukuran yang jauh melebihi toleransi yang diijinkan, sehingga tidak optimal untuk mencapai dimensi produk yang konsisten.

Nilai F-Value dari analisis ANOVA menegaskan bahwa faktor suhu memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas dimensi midsole karena F-Value yang diperoleh jauh lebih besar dari 1, sedangkan F-Value untuk faktor waktu mendekati 1, menunjukkan bahwa pengaruh waktu pendinginan tidak sebesar suhu. Meskipun demikian, pendekatan analitis untuk menentukan faktor waktu juga menghasilkan nilai yang mendekati kondisi optimal. Selain pengukuran dimensi, analisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) mengkonfirmasi perbedaan struktur foam di setiap kondisi pendinginan. Hasil SEM menunjukkan bahwa pada suhu 0°C dan 40°C, ukuran butiran foam cenderung lebih besar (75–200 µm) dibandingkan dengan suhu 20°C yang menghasilkan butiran dengan ukuran kecil-sedang (50–100 µm). Pola penyebaran butiran foam juga berbeda; bagian tengah midsole cenderung memiliki butiran yang lebih besar, sedangkan bagian terluar menunjukkan ukuran butiran yang lebih kecil. Pada suhu 20°C, distribusi ukuran butiran foam lebih seragam dibandingkan dengan kondisi 0°C dan 40°C.

Selain aspek dimensi, uji mekanis terhadap midsole menunjukkan adanya perbedaan kekerasan berdasarkan kondisi pendinginan. Hasil uji mekanis mengindikasikan bahwa midsole yang diproses pada suhu 20°C memiliki kekerasan yang lebih tinggi (52–54 Asker C) dibandingkan dengan midsole yang diproses pada suhu 0°C dan 40°C (47–50 Asker C). Data ini mengindikasikan adanya korelasi antara ukuran struktur foam dan kekerasan produk; semakin kecil ukuran butiran foam, semakin tinggi kekerasan midsole yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi pendinginan optimal untuk material EVA foam adalah pada suhu 20°C dengan waktu pendinginan 13 menit. Pada kondisi ini, penyimpangan dimensi pada scribe line dan top line berada dalam batas toleransi yang diijinkan, dan kekerasan midsole mencapai standar yang ditetapkan (52–54 Asker C). Temuan ini menunjukkan bahwa dengan pengaturan parameter pendinginan yang tepat, reject ratio produk dapat diminimalkan dan kualitas produk secara keseluruhan dapat ditingkatkan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi industri manufaktur sepatu, terutama dalam upaya mengurangi variabilitas dimensi produk dan meningkatkan konsistensi serta efisiensi produksi.

Rekomendasi yang dihasilkan mencakup implementasi sistem pendinginan yang mampu mengontrol suhu dan laju pendinginan secara real-time, penguatan pengendalian kualitas dengan pemeriksaan rutin menggunakan alat ukur digital, serta penyusunan prosedur operasional standar (SOP) yang komprehensif untuk seluruh proses EFIM. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi variabel lain seperti jenis blowing agent dan komposisi material, guna memperluas pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan foam dan kualitas produk akhir.

Referensi

- Mills, J. Nigel. (2007). *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*. UK: Butterworth-Heinemann.
- Mills, J. Nigel. (2005). *Plastic Microstructure and Applications* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Park, B. Chul, Ramesh, N.S., & Lee, Shau-Tarng. (2007). *Polymeric Foams Science and Technology*. Florida, USA: CRC Press.
- Harper, Charles A. (2000). *Modern Plastic Handbook*. USA: McGraw-Hill.
- Rosen, L. Stephen. (1993). *Fundamental Principles of Polymeric Material*. Missouri, USA: Wiley Interscience.
- Osswald, A. Tim, Turng, Lih-Sheng, & Gramann, Paul J. (2008). *Injection Molding Handbook* (2nd ed.). Hamburg: Hanser Fachbuchverlag.
- Roy, K. Ranjit. (2001). *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*. New York, USA: Wiley Interscience.
- Chu, K.M. Raymond, Howe, Lun Mark, Jahani, Davoud, & Park, Chul B. (2015). Estimation of the Foaming Temperature of Mold-Opening Foam Injection Molding Process. *Journal of Cellular Plastic*, 0(0), 1-23. Toronto, Ontario.
- Vlachopoulos, John, & Strutt, David. (2002). *Plastics Technician's Toolbox* (Vol. 2). USA: SPE.
- Le Goff, R., Poutot, G., Delaunay, D., Fulchiron, R., & Koscher, E. (2005). Study and Modeling of Heat Transfer During the Solidification of Semi-Crystalline Polymers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90. France.
- Jeng, Yi-Ren, Liu, De-Shin, & Yau, Hong-Tzong. (2012). Designing Experimental Methods to Predict the Expansion Ratio of EVA Foam Material and Using Finite Element Simulation to Estimate the Shoe Expansion Shape. National Chung Cheng University – Department of Mechanical Engineering.

- Belavendram, N. (1995). *Quality by Design: Taguchi Techniques for Industrial Experimentation*. Singapore: Prentice Hall.
- Spina, R. (2015). Technological characterization of PE/EVA blends for foam injection molding. *Materials & Design*, 84, 64-71.
- EL, S. (2018). Analysis of non-uniform expansion behavior of injected EVA. *Academic Journal of Polymer Science*, 1(4).
- Tsang, Y., Fu, H., Zhuang, Z., Chung, C., Huang, P., Chao, Y., & Liu, D. (2024). Demonstration Of Curing Degree Estimation Approach Of EVA Foam During Injection Moulding By Integrating Thermal–Physical Characteristics And FEA simulation. *Polymer Bulletin*, 82(5), 1643-1662.
- Paiva Junior, C. Z., Peruchi, R. S., Fim, F. D., Soares, W. D., & Da Silva, L. B. (2021). Performance of Ethylene Vinyl Acetate Waste (EVA-W) When Incorporated Into Expanded EVA Foam for Footwear. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128352.
- Tsang, Y., Fu, H., Huang, P., Yadav, B., & Liu, D. (2024). Injection Moulding Process Parameter And Strain Rate Dependence Mechanical Properties Measurement And Theoretical Estimation Of EVA Polymer Foam. *Journal of Mechanics*, 40, 2-10.
- Wang, G., Zhao, G., Dong, G., Mu, Y., Park, C. B., & Wang, G. (2018). Lightweight, Super-Elastic, And Thermal-Sound Insulation Bio-Based PEBA Foams Fabricated By High-Pressure Foam Injection Molding With Mold-Opening. *European Polymer Journal*, 103, 68-79.