

Bidang: Teknik Analisis Kimia Mineral Topik: Rekayasa dan Perancangan Proses Teknik Kimia

Analysis of the Effects of Injection Molding Parameters on LDPE Product Quality

Abdussalam Topandi¹, Afridon Dwi Putra Berutu², Azhara Remelia Martria³ dan M Adib Maqfiroh⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta
atopandi@stmi.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pembuatan produk plastik berbahan *Low Density Polyethylene* (LDPE) menggunakan metode injection molding. Tujuan utamanya adalah mengoptimalkan parameter proses untuk meningkatkan kualitas produk dan efisiensi energi. Variasi yang digunakan meliputi tekanan operasi (50-95 MPa) dan kecepatan *screw* (75-95 rpm) serta pengaturan suhu pada empat zona pemanas. Percobaan dilakukan dengan mesin *Injection Molding* Toshiba Type EC100AXII dan bahan LDPE sebanyak 1000 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan operasi dan kecepatan *screw* berpengaruh signifikan terhadap kualitas produk. Pada tekanan 80 MPa dan kecepatan 80 rpm, produk yang dihasilkan baik tanpa cacat. Namun, pada tekanan 60 MPa dan kecepatan 95 rpm, ditemukan cacat *short molding*. Efisiensi energi juga dianalisis dengan hasil 73,11%, menunjukkan penggunaan energi yang cukup efisien. Penelitian ini memberikan panduan praktis bagi industri plastik dalam memilih parameter proses yang tepat untuk menghasilkan produk berkualitas dengan konsumsi energi minimal. Temuan ini relevan untuk pengembangan produksi LDPE yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Injection molding*, LDPE, tekanan operasi, kecepatan *screw*, efisiensi energi.

ABSTRACT

This study explores the production of Low Density Polyethylene (LDPE) plastic products using the injection molding method. The main objective is to optimize process parameters to improve product quality and energy efficiency. The variations include operating pressure (50-95 MPa) and screw speed (75-95 rpm), as well as temperature settings in four heating zones. The experiment was conducted using a Toshiba Type EC100AXII Injection Molding machine with 1000 grams of LDPE material. The results indicate that operating pressure and screw speed significantly impact product quality. At 80 MPa pressure and 80 rpm speed, high-quality products were produced without defects. However, at 60 MPa pressure and 95 rpm speed, short molding defects were observed. Energy efficiency was also analyzed, yielding a result of 73.11%, indicating relatively efficient energy usage. This research provides practical guidance for the plastic industry in selecting appropriate process parameters to produce high-quality products with minimal energy consumption. These findings are relevant for the development of more efficient and sustainable LDPE production..

Keywords: *Injection molding*, LDPE, operating pressure, screw speed, energy efficiency.

PENDAHULUAN

Low Density Polyethylene (LDPE) adalah salah satu termoplastik yang paling banyak digunakan terutama karena sifatnya yang serbaguna, termasuk fleksibilitas, ringan, dan ketahanan yang luar biasa terhadap bahan kimia [1]. Senyawa ini digunakan dalam produksi berbagai barang konsumen, mulai dari material kemasan, kontainer, hingga komponen plastik, menjadikannya salah satu resin polimer yang paling sering digunakan [2]. Popularitas produk plastik yang beragam dan berkualitas tinggi semakin meningkat, sehingga saat ini dibutuhkan proses yang efisien untuk memproduksi plastik LDPE sambil memenuhi persyaratan industri dan standar konsumen [3], [4].

Injection molding adalah salah satu proses manufaktur yang paling umum digunakan untuk menciptakan bentuk plastik yang rumit dan presisi [5]. Metode ini dikenal karena kemampuannya memproduksi produk dalam skala besar

dengan hasil yang rumit, detail, dan seragam dalam waktu singkat [6]. Namun, kualitas akhir dari produk LDPE sangat ditentukan oleh berbagai parameter pada mesin *injection molding*, seperti tekanan operasi, kecepatan *screw*, pengaturan suhu *nozzle* di berbagai zona, dan lainnya [5], [7]. Penyesuaian yang tepat terhadap parameter-parameter tersebut dapat membantu mencegah cacat umum seperti deformasi, pengisian yang tidak sempurna, dan ketidaksempurnaan permukaan [8].

Kunci utama dalam produksi LDPE dengan standar yang tinggi adalah pemahaman tentang hubungan parameter *injection molding* dengan sifat dari produknya [5]. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis terhadap pengaruh perubahan kondisi pemrosesan terhadap kualitas produk LDPE. Aspek utama dari penelitian ini adalah fokusnya pada keberlanjutan di sektor manufaktur plastik. Mengoptimalkan parameter *injection molding* agar dapat menghasilkan penggunaan material yang lebih efisien, mengurangi limbah dan konsumsi energi selama produksi [9]. Hal ini sejalan dengan meningkatnya penekanan industri pada keberlanjutan dan kebutuhan untuk mengembangkan praktik ramah lingkungan. Dengan meningkatkan efisiensi produksi LDPE, produsen dapat berkontribusi untuk mengurangi jejak lingkungan yang terkait dengan manufaktur plastik [10].

Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan praktis bagi industri plastik, membantu produsen dalam menyempurnakan proses cetak injeksi mereka untuk LDPE. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk tetapi juga berupaya untuk menawarkan pedoman bagi praktik manufaktur yang berkelanjutan. Penelitian ini berkontribusi pada bidang pemrosesan polimer yang lebih luas dengan memajukan pengetahuan tentang bagaimana kontrol yang tepat atas parameter cetak injeksi dapat menghasilkan produk LDPE yang berkinerja lebih baik dan lebih ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bahan Low Density Polyethylene (LDPE) sebagai material utama dalam proses *injection molding*. Proses ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh berbagai parameter terhadap kualitas produk LDPE yang dihasilkan. Alat utama yang digunakan adalah mesin *Injection Molding* merk Toshiba Type EC100AXII, yang dilengkapi dengan sistem pengaturan suhu pada beberapa zona pemanas, kontrol tekanan, dan kecepatan *screw*.

Tahap awal penelitian dimulai dengan persiapan alat dan bahan. Mesin *injection molding* disiapkan dan dipanaskan hingga mencapai suhu operasi yang ditentukan. Suhu diatur pada empat zona pemanas, yaitu *Heat Nozzle* dan tiga zona pemanas lainnya, dengan rentang suhu antara 140°C hingga 170°C. Selain itu, parameter tekanan operasi dan kecepatan *screw* juga diatur sesuai dengan variasi yang telah direncanakan [11]. Bahan LDPE dimasukkan ke dalam hopper dan dilelehkan sebelum diinjeksikan ke dalam cetakan.

Pada tahap eksperimen, variasi parameter meliputi tekanan operasi (50-95 MPa) dan kecepatan *screw* (75-95 rpm). Masing-masing variasi diuji sebanyak tiga kali untuk memastikan konsistensi hasil. Produk LDPE yang dihasilkan kemudian dievaluasi berdasarkan kualitas visual dan struktural, dengan fokus pada adanya cacat seperti deformasi, *short molding*, dan ketidaksempurnaan permukaan [5]. Setiap sampel yang dihasilkan didokumentasikan dan dicatat hasil pengamatannya untuk analisis lebih lanjut.

Data yang diperoleh dianalisis untuk menentukan hubungan antara parameter proses dan kualitas produk LDPE. Pengujian efisiensi energi juga dilakukan dengan mengukur konsumsi daya pada pemanasan barrel dibandingkan dengan energi total yang terserap oleh material LDPE selama proses *injection molding*. Hasil perhitungan efisiensi energi ini digunakan untuk mengkaji seberapa efektif penggunaan energi dalam proses produksi LDPE [5].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, akan dibahas pengaruh dari variasi parameter proses *injection molding* terhadap kualitas produk *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang dihasilkan. Parameter yang dievaluasi meliputi tekanan operasi dan kecepatan *screw*, yang keduanya memiliki peranan penting dalam menentukan sifat akhir produk LDPE. Selain itu, perhitungan efisiensi energi dilakukan untuk mengevaluasi seberapa efisien penggunaan energi selama proses produksi berlangsung. Melalui analisis yang sistematis, diharapkan dapat ditemukan parameter optimal yang tidak hanya menghasilkan produk dengan kualitas tinggi tetapi juga menghemat energi dalam proses manufaktur. Hasil-hasil ini memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan antara parameter proses dengan kualitas produk serta efisiensi dalam produksi LDPE.

Pengaruh Tekanan Operasi dan Kecepatan *Screw* terhadap Kualitas Produk LDPE

Dalam melakukan analisis pengaruh parameter *injection molding* terhadap kualitas produk LDPE, data hasil percobaan yang mencakup variasi tekanan operasi, kecepatan *screw*, dan temperatur zona pemanas dirangkum dalam Tabel 1 dan Tabel 1. Tabel 1 menyajikan pengaturan suhu pada setiap zona pemanas selama proses percobaan, sementara

Tabel 2 menampilkan variasi tekanan operasi dan kecepatan screw yang diterapkan oleh tiga operator yang berbeda. Data ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai bagaimana parameter-parameter tersebut memengaruhi kualitas produk dan efisiensi energi dalam proses injection molding LDPE.

Tabel 1. Temperatur operasi percobaan

Temperatur Operasi (°C)	HN	H1	H2	H3
	170	160	150	140

Tabel 2. Variasi Percobaan

Variabel	1	2	3	4	5	6
Tekanan Operasi (MPa)	95	90	80	75	50	60
Cycle Time (detik)	34,76	25,26	35,88	28,99	23,21	22,18
Kecepatan Screw (rpm)	90	90	80	75	75	95
Waktu Pendinginan (s)	10	10	10	10	10	10
Waktu Injection (detik)	10	10	10	10	10	10
Kualitas Produk	<i>Not Good</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Not Good</i>

Tabel 1 menunjukkan pengaturan temperatur operasi yang digunakan selama percobaan, yang meliputi empat zona: *Heat Nozzle* (HN) dengan suhu 170°C, H1 pada 160°C, H2 pada 150°C, dan H3 pada 140°C. Pengaturan suhu ini bertujuan untuk memastikan material LDPE melebur secara optimal sebelum diinjeksikan ke dalam cetakan.

Dari hasil Tabel 2, terlihat bahwa tekanan operasi yang terlalu tinggi, seperti pada Variabel 6 dengan tekanan 95 MPa, menghasilkan produk dengan cacat (*Not Good*), yang menunjukkan ketidakstabilan dimensi akibat tekanan berlebih. Sebaliknya, pada tekanan operasi 90 MPa pada Variabel 2, produk yang dihasilkan berkualitas baik (*Good*). Ini menunjukkan bahwa penurunan tekanan dari 95 MPa ke 90 MPa dapat meningkatkan kualitas produk LDPE [12], [13].

Tekanan operasi dalam proses *injection molding* sangat berpengaruh terhadap distribusi material LDPE di dalam cetakan. Tekanan rendah, seperti pada 50 MPa, mengakibatkan produk dengan cacat (*Not Good*) karena material LDPE tidak memiliki cukup tekanan untuk mengalir dan mengisi seluruh ruang cetakan. Fenomena ini terjadi karena aliran polimer menjadi lambat, menyebabkan pembentukan aliran yang tidak sempurna dan mengakibatkan terjadinya *short molding* atau ketidakterisian cetakan pada area yang sulit dijangkau [5]. Tekanan yang terlalu rendah menyebabkan aliran material tidak dapat mengatasi hambatan aliran dalam cetakan, sementara tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan ketidakstabilan termal dan penyusutan berlebih pada LDPE saat proses pendinginan [5], [14].

Sebaliknya, tekanan yang lebih tinggi, seperti pada 90 MPa, mampu meningkatkan aliran material sehingga LDPE dapat mengisi cetakan dengan baik, menghasilkan produk berkualitas (*Good*). Tekanan ini memberikan dorongan yang cukup untuk mengatasi viskositas LDPE yang cenderung tinggi pada suhu operasi, sehingga material dapat mengalir lebih merata dan mengisi seluruh cetakan tanpa terjadinya kekosongan [5], [15], [16].

Namun, jika tekanan terlalu tinggi, seperti pada 95 MPa, terjadi fenomena deformasi pada produk LDPE. Hal ini dikarenakan tekanan berlebih memberikan gaya dorong yang terlalu kuat pada material, sehingga saat proses pendinginan terjadi, material LDPE mengalami penyusutan yang tidak seragam. Akibatnya, produk dapat mengalami distorsi dimensi atau cacat permukaan karena material mengkerut secara tidak merata [17], [18], [19].

Kecepatan *screw* menentukan seberapa cepat material LDPE dilelehkan, diaduk, dan diinjeksikan ke dalam cetakan. Pada kecepatan rendah, seperti 75 rpm, proses pencampuran dan pelelehan LDPE berlangsung lambat, memberikan waktu yang cukup untuk pemanasan material secara merata. Namun, kecepatan yang terlalu lambat juga dapat meningkatkan risiko terjebaknya udara di dalam cetakan, yang dapat mengakibatkan adanya gelembung atau *void* di dalam produk [5], [15].

Kecepatan optimal, seperti 80 rpm, memberikan keseimbangan yang baik antara pencampuran material dan pengisian cetakan. Pada kecepatan ini, material LDPE cukup cair untuk mengalir dengan baik ke seluruh bagian cetakan tanpa menyebabkan pembentukan retakan atau gelembung udara [5]. Namun, kecepatan yang terlalu tinggi, seperti 95 rpm,

dapat menyebabkan material LDPE mengalir terlalu cepat, yang mengurangi waktu pendinginan dan menyebabkan pendinginan yang tidak merata. Akibatnya, permukaan produk dapat mengalami retakan halus atau cacat visual lainnya karena penyusutan yang tidak merata [15], [17].

Kecepatan screw yang terlalu tinggi mempercepat aliran material sehingga waktu pendinginan menjadi tidak cukup, yang dapat menyebabkan pembentukan cacat pada produk. Di sisi lain, kecepatan yang terlalu rendah dapat menghambat distribusi material yang merata, menyebabkan cacat internal seperti *void* [20], [21], [22].



Gambar 1. Produk LDPE. Sebelah kiri Produk *Good*, Sebelah kanan Produk *Not Good*

Efisiensi Energi dalam Proses Injection Molding

Dalam percobaan ini, efisiensi penggunaan energi adalah salah satu fokus utama dalam proses injection molding LDPE. Efisiensi penggunaan energi penting untuk mengoptimalkan proses produksi sehingga menghasilkan produk berkualitas dengan konsumsi energi yang ekonomis. Berdasarkan laporan praktikum, perhitungan energi dilakukan dengan mengukur konsumsi energi yang digunakan selama satu siklus produksi, kemudian membandingkannya dengan energi yang secara efektif digunakan untuk menghasilkan produk [23], [24].

Penggunaan energi dihitung berdasarkan daya yang dikonsumsi oleh mesin *injection molding* dan waktu siklus produksi. Rumus untuk menghitung total energi yang digunakan selama satu siklus adalah sebagai berikut:

$$\text{Energi yang Digunakan (kWh)} = \text{Daya Mesin (kW)} \times \frac{\text{Waktu Siklus (detik)}}{3600 \text{ detik/jam}} \quad (1)$$

Daya mesin yang digunakan selama proses pemanasan dan injeksi LDPE tercatat sebesar 20 kW. Waktu siklus rata-rata yang digunakan pada parameter optimal (tekanan 80 MPa dan kecepatan screw 80 rpm) adalah 35,88 detik. Dengan data ini, total energi yang digunakan dapat dihitung menggunakan rumus di atas.

Setelah mendapatkan nilai total energi yang digunakan, langkah berikutnya adalah menghitung efisiensi penggunaan energi. Efisiensi energi ditentukan dengan membandingkan energi efektif yang diserap oleh material LDPE selama proses pelelehan dan pencetakan dengan total energi yang dikonsumsi oleh mesin [25]. Rumus untuk efisiensi penggunaan energi adalah:

$$\text{Efisiensi Energi (\%)} = \left(\frac{\text{Energi Efektif yang Digunakan}}{\text{Total Energi yang Dikonsumsi}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Dari hasil percobaan, pada tekanan operasi 80 MPa dan kecepatan screw 80 rpm, efisiensi penggunaan energi mencapai angka yang cukup tinggi, sekitar 73,11%. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang dikonsumsi oleh mesin *injection molding* digunakan secara efektif untuk proses pemanasan dan pencetakan material LDPE. Angka ini diperoleh karena pemilihan parameter optimal yang memastikan pemanasan material terjadi secara efisien dan waktu pendinginan cukup untuk menghindari cacat produk [5], [26].

Pada kondisi parameter yang tidak optimal, seperti tekanan operasi yang terlalu tinggi (95 MPa) atau kecepatan screw yang berlebihan (95 rpm), efisiensi penggunaan energi cenderung menurun. Hal ini dikarenakan konsumsi energi meningkat untuk menjaga kestabilan suhu dan tekanan selama proses berlangsung, tanpa ada peningkatan signifikan pada kualitas produk yang dihasilkan. Akibatnya, terjadi pemborosan energi yang tidak diperlukan, yang mengurangi nilai efisiensi keseluruhan [27], [28].

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas produk LDPE sangat dipengaruhi oleh pengaturan parameter proses injection molding. Variasi tekanan operasi dan kecepatan screw secara signifikan memengaruhi distribusi dan aliran material di dalam

cetakan. Pengaturan yang tepat, seperti tekanan 80-90 MPa dan kecepatan screw 80 rpm, menghasilkan produk berkualitas tinggi tanpa cacat. Sebaliknya, parameter yang ekstrem dapat menyebabkan cacat seperti deformasi dan retakan pada permukaan produk.

Selain itu, pengendalian parameter proses juga memengaruhi efisiensi energi selama produksi LDPE. Pemilihan parameter optimal memungkinkan energi yang digunakan selama injection molding dimanfaatkan secara efektif, dengan efisiensi energi mencapai 73,11%. Ini menunjukkan bahwa penggunaan energi yang tepat tidak hanya meningkatkan kualitas produk, tetapi juga mengurangi pemborosan, biaya produksi, dan dampak lingkungan. Hasil penelitian ini memberikan panduan praktis bagi produsen untuk menyempurnakan proses produksi LDPE yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik STMI Jakarta atas dukungan fasilitas dan kesempatan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh pihak yang telah mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Maraschin, "Polyethylene, Low Density," dalam *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley, 2005. doi: 10.1002/0471238961.12152316050219.a01.pub2.
- [2] A. Emblem, "Plastics properties for packaging materials," dalam *Packaging Technology*, Elsevier, 2012, hlm. 287–309. doi: 10.1533/9780857095701.2.287.
- [3] J. Qiao *dkk.*, "Recent advances in polyolefin technology," *Polym Chem*, vol. 2, no. 8, hlm. 1611, 2011, doi: 10.1039/c0py00352b.
- [4] R. A. Northam, "Improved Hdpe Films Utilizing New Resin Innovations," *Journal of Plastic Film & Sheeting*, vol. 1, no. 1, hlm. 41–49, Jan 1985, doi: 10.1177/875608798500100108.
- [5] N. Roslan, S. Zamree Abd Rahim, N. Hidayah Mohamad, Huzaim, dan N. Aisyah Miza Ahmad Tamizi, "Optimization of Shrinkage and Strength of the Molded Part Produced using LDPE (Virgin and Recycled) material: A Review," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 551, no. 1, hlm. 012026, Agu 2019, doi: 10.1088/1757-899X/551/1/012026.
- [6] M. Czepiel, M. Bańkosz, dan A. Sobczak-Kupiec, "Advanced Injection Molding Methods: Review," *Materials*, vol. 16, no. 17, hlm. 5802, Agu 2023, doi: 10.3390/ma16175802.
- [7] N. R. A. Rahman, Z. Hamzah, M. H. M. Haris, N. A. Faris, Z. Shayfull, dan M. Fathullah, "A parameter study of plastic injection moulding process on polypropylene material for USB clip," 2018, hlm. 020076. doi: 10.1063/1.5066717.
- [8] Z. Chen dan L. Turng, "A review of current developments in process and quality control for injection molding," *Advances in Polymer Technology*, vol. 24, no. 3, hlm. 165–182, Sep 2005, doi: 10.1002/adv.20046.
- [9] A. Elduque, D. Elduque, C. Javierre, Á. Fernández, dan J. Santolaria, "Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts," *J Clean Prod*, vol. 108, hlm. 80–89, Des 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.119.
- [10] H. P. S. Abdul Khalil *dkk.*, "Microbial-induced CaCO₃ filled seaweed-based film for green plasticulture application," *J Clean Prod*, vol. 199, hlm. 150–163, Okt 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.111.
- [11] J. G. Li dan L. Kang, "Key Technology Research on Mould Heating System of Injecting Machine," *Adv Mat Res*, vol. 97–101, hlm. 3579–3582, Mar 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3579.
- [12] J. Schedelmaier dan M. Połzl, "Development of Materials, Design, Calculation and Testing of High Pressure Equipment, Especially for Low Density Polyethylene Plants," dalam *High Pressure Technology*, ASMEDC, Jan 2002, hlm. 51–58. doi: 10.1115/PVP2002-1166.
- [13] M. Blome dan S. Rueckriem, "Optimization of High Pressure Components for LDPE Manufacturing," dalam *Volume 5: High-Pressure Technology; Rudy Scavuzzo Student Paper Symposium and 24th Annual Student Paper Competition; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis Division (NDPD); Electric Power Research Institute (EPRI) Creep Fatigue Workshop*, American Society of Mechanical Engineers, Jul 2016. doi: 10.1115/PVP2016-63480.
- [14] C. Leyva-Porras, M. A. Esneider-Alcalá, A. Toxqui-Terán, A. Márquez-Lucero, dan J. A. Aguilar-Martínez, "Effect of Molding Parameters on Young's Modulus of an Injection Molded Low-Density Polyethylene (LDPE)," *Ind Eng Chem Res*, vol. 52, no. 16, hlm. 5666–5671, Apr 2013, doi: 10.1021/ie3032422.
- [15] P. L. RAMKUMAR, D. M. KULKARNI, dan V. V CHAUDHARI, "Parametric and mechanical characterization of

- linear low density polyethylene (LLDPE) using rotational moulding technology,” *Sadhana*, vol. 39, no. 3, hlm. 625–635, 2014, doi: 10.1007/s12046-013-0223-4.
- [16] C. Keawkanoksilp, W. Apimonsiri, S. Patcharaphun, dan N. Sombatsompop, “Rheological properties and melt strength of LDPE during coextrusion process,” *J Appl Polym Sci*, vol. 125, no. 3, hlm. 2187–2195, Agu 2012, doi: 10.1002/app.36427.
- [17] K. Sakauchi, T. Takebe, H. Uehara, T. Yamada, Y. Obata, dan T. Kanai, “Influence of Cooling Water Temperature on Properties of LLDPE Film in Double Bubble Tubular Film Process,” *Journal of Polymer Engineering*, vol. 28, no. 4, Jun 2008, doi: 10.1515/POLYENG.2008.28.4.243.
- [18] H. A. Khonakdar, J. Morshedian, H. Eslami, dan F. Shokrollahi, “Study of heat shrinkability of crosslinked low-density polyethylene/poly(ethylene vinyl acetate) blends,” *J Appl Polym Sci*, vol. 91, no. 3, hlm. 1389–1395, Feb 2004, doi: 10.1002/app.13426.
- [19] E. Gamache, J.-F. Agassant, Y. Demay, dan P. G. Lafleur, “Evaluation of Stresses in a Two-Layer Co-Extruded LDPE Melt Blown Film,” *Journal of Plastic Film & Sheeting*, vol. 21, no. 2, hlm. 127–144, Apr 2005, doi: 10.1177/8756087905057006.
- [20] D. Rahmalina, H. Sukma, dan Andry, “Effect of the Processing Parameters on the Shrinkage Defect Using A High-Pressure Die-Casting Process,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 553, no. 1, hlm. 012037, Nov 2019, doi: 10.1088/1757-899X/553/1/012037.
- [21] S. M. S. Mukras, “Experimental-Based Optimization of Injection Molding Process Parameters for Short Product Cycle Time,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, hlm. 1–15, Mar 2020, doi: 10.1155/2020/1309209.
- [22] L. Li dan S. Mekid, “Resin Velocity and Temperature in Screw Processing,” *Polym Plast Technol Eng*, vol. 47, no. 11, hlm. 1162–1169, Okt 2008, doi: 10.1080/03602550802391680.
- [23] H. Li, H. Zhang, J. Carrell, dan D. Tate, “Integrating Energy-saving Concept into General Product Design,” dalam *2007 32nd IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, IEEE, Okt 2007, hlm. 335–338. doi: 10.1109/IEMT.2007.4417085.
- [24] T. A. L. Nguyen, L. N. H. Tran, H. Paris, dan M. Museau, “Evaluating Energy Efficiency of Production Machine,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 889, hlm. 580–587, Mar 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.889.580.
- [25] J. Madan, M. Mani, dan K. W. Lyons, “Characterizing Energy Consumption of the Injection Molding Process,” dalam *Volume 2: Systems; Micro and Nano Technologies; Sustainable Manufacturing*, American Society of Mechanical Engineers, Jun 2013. doi: 10.1115/MSEC2013-1222.
- [26] F.-C. Kung dan Y.-J. Weng, “Optimizations of the Processing Parameters of High-Performance Engineering Plastic in Injection Molding,” *Polym Plast Technol Eng*, vol. 47, no. 11, hlm. 1154–1161, Okt 2008, doi: 10.1080/03602550802391672.
- [27] Y. Ammar, S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, dan A. P. Roskilly, “Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK,” *Appl Energy*, vol. 89, no. 1, hlm. 3–20, Jan 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
- [28] B. Muster-Slawitsch, M. Hubmann, M. Murkovic, dan C. Brunner, “Process modelling and technology evaluation in brewing,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 84, hlm. 98–108, Okt 2014, doi: 10.1016/j.cep.2014.03.010.