

Rancang Bangun Sistem Pengendali Suhu Barrel Pada Mesin Single Screw Extruder Menggunakan Metode PID Berbasis ESP32

Yani Prabowo¹, Anwar Rifai^{2*}, Jan Everhard³

^{1,2}Fakultas Teknologi Informasi, Sistem Komputer, Universitas Budi Luhur, Jakarta, Indonesia

³Fakultas Teknologi Informasi, Teknik Informatika, Universitas Budi Luhur, Jakarta, Indonesia

E-mail: ¹yani.prabowo@budiluhur.ac.id, ^{2*}anwar.rifai@budiluhur.ac.id, ³jan.everhard@budiluhur.ac.id

(* : corresponding author)

Abstrak

Stabilitas suhu pada barrel merupakan faktor krusial dalam proses ekstrusi polimer karena fluktuasi temperatur secara langsung memengaruhi viskositas lelehan dan kualitas produk akhir. Penelitian ini merancang sistem kendali suhu pada mesin single screw extruder menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan membandingkan performa metode Proportional-Integral-Derivative (PID) terhadap sistem tanpa kontrol (open loop). Metodologi penelitian dilakukan melalui pengujian variasi kecepatan putaran screw pada 50 hingga 200 RPM untuk mengamati stabilitas suhu barrel dan homogenitas hasil lelehan. Penentuan parameter PID pada penelitian ini didasarkan pada evaluasi pemetaan karakteristik respon termal sistem open-loop, yang menghasilkan nilai tuning optimal sebesar $K_p = 4,8$; $K_i = 0,09$; dan $K_d = 55$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem tanpa kontrol mengalami fluktuasi suhu sebesar $\pm 8-12^{\circ}\text{C}$, sedangkan penggunaan pengendali PID berhasil menjaga stabilitas suhu dengan deviasi rendah sebesar $\pm 1-3^{\circ}\text{C}$. Selain itu, sistem PID mampu secara otomatis mengompensasi kenaikan suhu akibat panas gesekan material pada kecepatan tinggi. Implementasi kontrol PID terbukti meningkatkan stabilitas termal hingga 80% dibandingkan sistem konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan algoritma PID pada mikrokontroler mampu menjamin konsistensi proses ekstrusi plastik yang lebih presisi dan stabil dibandingkan metode tradisional.

Kata kunci: *single screw extruder*, pengendalian PID, ESP32, suhu barrel, proses ekstrusi

Abstract

Barrel temperature stability is a crucial factor in the polymer extrusion process, as temperature fluctuations directly affect melt viscosity and final product quality. This study designed a temperature control system for a single-screw extruder using an ESP32 microcontroller to compare the performance of the Proportional-Integral-Derivative (PID) method against a system without control (open loop). The research methodology involved testing various screw rotation speeds from 50 to 200 RPM to observe barrel temperature stability and melt homogeneity. The determination of the PID parameters in this study was based on the evaluation of the open-loop system's thermal response mapping, yielding optimal tuning values of $K_p = 4.8$, $K_i = 0.09$, and $K_d = 55$. The test results showed that the system without control experienced temperature fluctuations of $\pm 8-12^{\circ}\text{C}$, while the PID controller successfully maintained temperature stability with a low deviation of $\pm 1-3^{\circ}\text{C}$. Furthermore, the PID system was able to automatically compensate for temperature increases caused by material friction at high speeds. The implementation of PID control was proven to increase thermal stability by up to 80% compared to conventional systems. These results demonstrate that the use of PID algorithms on microcontrollers ensures a more precise and stable plastic extrusion process compared to traditional methods.

Keywords: *single screw extruder*, PID control, ESP32, barrel temperature, extrusion process

1. PENDAHULUAN

Plastik merupakan salah satu material yang paling mendominasi berbagai sektor kehidupan modern, mulai dari kemasan makanan, komponen otomotif, hingga perangkat medis, karena sifatnya yang ringan, tahan lama, dan biaya produksi yang relatif rendah [1]. Namun, karakteristik ketahanannya yang tinggi justru menjadi ancaman serius bagi ekosistem global karena plastik membutuhkan waktu ratusan tahun untuk dapat terurai secara alami [2]. Di Indonesia, permasalahan sampah plastik telah mencapai tahap yang mengkhawatirkan, di mana timbunan sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) terus meningkat tanpa diimbangi dengan sistem pengolahan yang komprehensif [3] [4]. Meskipun upaya daur ulang telah mulai berkembang,

volume plastik yang berhasil diolah kembali masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan total sampah yang dihasilkan setiap harinya [5].

Secara teknis, berbagai jenis polimer seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), *High-Density Polyethylene* (HDPE), hingga *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) memiliki potensi nilai ekonomi yang tinggi jika dikelola melalui teknologi yang tepat [6] [7]. Salah satu metode yang paling menjanjikan dalam mendukung konsep ekonomi sirkular adalah proses daur ulang mekanis menggunakan teknologi ekstrusi [8]. Ekstrusi merupakan proses manufaktur di mana material termoplastik dilelehkan secara berkelanjutan dan didorong melalui cetakan (*die*) untuk menghasilkan produk dengan profil tertentu, seperti filamen untuk pencetakan 3D, pipa, maupun lembaran plastik baru [9] [10]. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada kontrol parameter fisik, di mana kestabilan suhu pada zona *barrel* memegang peranan paling vital [11].

Ketidakstabilan suhu selama proses ekstrusi dapat memicu berbagai masalah teknis yang fatal [12]. Jika suhu terlalu rendah, viskositas polimer akan meningkat, menyebabkan beban kerja motor penggerak semakin berat dan berisiko merusak sistem mekanis mesin [13]. Sebaliknya, jika terjadi *overshoot* atau suhu melebihi ambang batas degradasi termal, material plastik akan mengalami kerusakan struktur molekul yang menyebabkan perubahan warna, penurunan kekuatan mekanis, hingga terbentuknya gelembung udara pada produk akhir [14]. Penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa akurasi kontrol temperatur tidak hanya meningkatkan kualitas fisik produk, tetapi juga berkontribusi secara signifikan terhadap efisiensi energi sistem secara keseluruhan [15] [16].

Pada mesin ekstruder konvensional yang digunakan di tingkat laboratorium atau industri kecil (UMKM), sistem pengendalian panas umumnya masih menggunakan metode *ON-OFF* atau *proportional* sederhana. Metode ini memiliki kelemahan mendasar berupa osilasi suhu yang besar dan respon yang lambat dalam menghadapi gangguan beban termal, seperti saat material dingin baru dimasukkan ke dalam *hopper*. Keterbatasan ini mendorong perlunya implementasi algoritma kendali yang lebih cerdas, seperti *Proportional-Integral-Derivative* (PID) [17]. Algoritma PID diakui secara luas di dunia industri karena kemampuannya dalam meminimalkan *error steady-state*, mempercepat waktu naik (*rise time*), dan meredam fluktuasi sistem secara aktif melalui perhitungan aksi proporsional, integral, dan derivatif yang tepat [18] [19].

Sejalan dengan tren Industri 4.0, kebutuhan akan sistem kendali yang tidak hanya presisi tetapi juga ekonomis dan terintegrasi secara digital menjadi sangat mendesak. Penggunaan mikrokontroler berbasis *Internet of Things* (IoT) seperti ESP32 menjadi terobosan baru dalam pengembangan alat kontrol suhu industri skala kecil [20] [21]. ESP32 menawarkan performa komputasi yang tinggi melalui prosesor *dual-core*, konsumsi daya rendah, serta konektivitas nirkabel terintegrasi (Wi-Fi dan Bluetooth) yang memungkinkan pemantauan data secara *real-time* [22]. Dengan kemampuan *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) yang mumpuni, ESP32 sangat ideal untuk diaplikasikan dalam mengatur daya elemen pemanas (*heater*) berdasarkan masukan dari sensor suhu presisi seperti *thermocouple* [23].

Integrasi antara algoritma PID dan mikrokontroler ESP32 pada mesin ekstruder plastik memberikan dimensi baru dalam fleksibilitas sistem [24] [25]. Selain meningkatkan stabilitas termal, platform ini memungkinkan operator untuk melakukan pencatatan data (*data logging*) secara digital, yang sangat berguna untuk analisis kualitas produksi jangka panjang. Namun, implementasi ini tetap memerlukan kajian mendalam mengenai karakteristik termal mesin, mengingat setiap mesin ekstruder memiliki inersia panas yang berbeda-beda. Proses *tuning* parameter PID (K_p, K_i, K_d) menjadi tahapan yang sangat krusial untuk memastikan sistem dapat memberikan respon terbaik sesuai dengan karakteristik fisik massa logam *barrel* dan jenis polimer yang diolah [26].

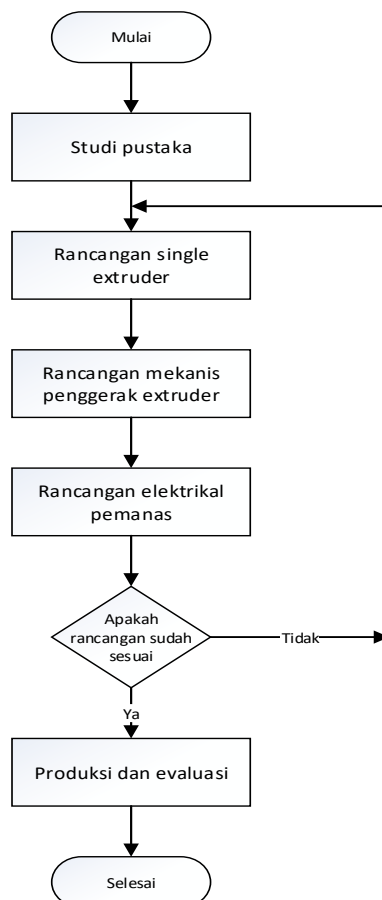
Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya meningkatkan sistem kendali suhu pada proses manufaktur dan ekstrusi [27]. Namun, mayoritas dari studi tersebut mengandalkan *Programmable Logic Controller* (PLC) standar industri yang membutuhkan biaya investasi tinggi sehingga kurang aplikatif untuk sektor UMKM, atau menggunakan mikrokontroler dasar yang tidak memiliki fitur komputasi dan konektivitas yang memadai untuk pengembangan *Internet of*

Things (IoT). Di sisi lain, penelitian yang menerapkan algoritma tingkat lanjut seperti *machine learning* [28], [29] umumnya membutuhkan daya komputasi besar dan rumit untuk diimplementasikan secara portabel. Keterbatasan dari studi-studi terdahulu ini menciptakan celah penelitian, di mana belum adanya evaluasi empiris yang komprehensif mengenai penerapan kendali PID pada mikrokontroler berbiaya rendah namun berkinerja tinggi seperti ESP32, yang secara spesifik diuji secara komparatif untuk menangani inersia termal pada mesin *single screw extruder* skala kecil.

Berdasarkan latar belakang masalah yang kompleks tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan, implementasi, dan pengujian performa sistem kendali suhu PID berbasis ESP32 pada mesin *single screw extruder*. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mencapai stabilitas suhu yang optimal, tetapi juga untuk mengevaluasi efektivitas sistem melalui perbandingan langsung dengan sistem tanpa kendali (*open loop*). Evaluasi kinerja dilakukan secara komprehensif dengan mengukur parameter teknis seperti *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *error steady-state*. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi teknis yang andal bagi pengembangan mesin daur ulang plastik yang lebih efisien dan terjangkau bagi masyarakat serta sektor UMKM.

2. METODE PENELITIAN

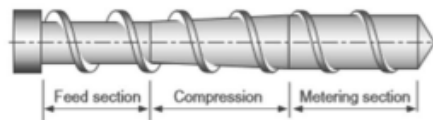
Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode rancang bangun (*research and development*) yang mengikuti tahapan sistematis sesuai dengan diagram alir pada Gambar 1. Tahapan penelitian dimulai dari studi pustaka mengenai prinsip kerja ekstruder dan teknologi pengelolaan limbah plastik. Tahapan berikutnya meliputi perancangan sistem mekanik dan sistem elektrik hingga tahap evaluasi performa mesin.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

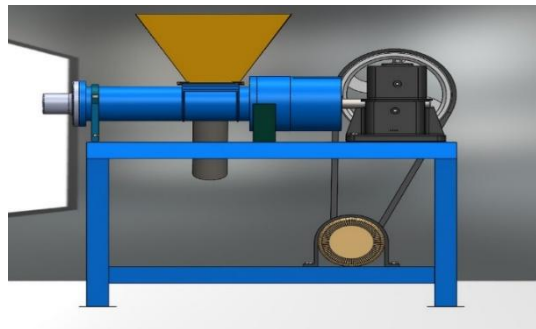
2.1 Desain dan Pengembangan Mesin Extruder

Mesin yang dirancang merupakan single screw extruder yang berfungsi untuk mencampur, melelehkan, dan mencetak material plastik melalui kombinasi komponen barrel, screw, dan die head. Rancangan screw pada mesin ini memiliki karakteristik conical, yaitu bagian inti screw membesar ke arah dies sehingga menghasilkan kompresi material yang optimal. Berdasarkan fungsinya, area ekstrusi dibagi menjadi tiga zona utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Feed Section Merupakan area pertama yang dilewati material berupa pelet setelah keluar dari hopper. Pada zona ini material plastik masih berada dalam kondisi padat.



Gambar 2. Area extruder

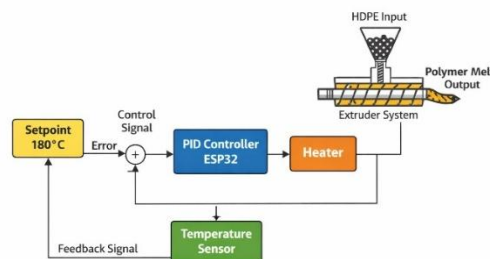
Compression Section Zona ini merupakan tahap di mana material mulai mengalami peningkatan suhu hingga mencapai titik leleh, sehingga sering disebut sebagai *melting section*. *Metering Section* Pada zona ini kedalaman *screw* lebih kecil sehingga menghasilkan tingkat kompresi yang lebih tinggi. Dimensi *screw* pada bagian ini dijaga konstan untuk memastikan kestabilan aliran lelehan plastik sebelum keluar melalui dies. Rancangan fisik mesin secara keseluruhan yang bersifat kompak dan portabel diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Mesin Extruder tampak samping

2.2 Rancangan Kelistrikan dan Sistem Kendali PID

Sistem kendali suhu dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang mengimplementasikan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Tujuan utama sistem ini adalah menjaga stabilitas suhu barrel pada nilai setpoint sebesar 180°C . Diagram sistem kendali tertutup (*closed-loop control system*) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skematik rangkaian menggunakan esp32 sebagai pengendali PID

Dalam sistem kendali ini, sinyal kesalahan (*error*) dihitung sebagai selisih antara suhu referensi (*setpoint*) dan suhu aktual yang dibaca oleh sensor. Persamaan *error* dinyatakan sebagai rumus (1).

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

di mana: $e(t)$ adalah nilai *error*, $r(t)$ adalah suhu referensi (*setpoint*), dan $y(t)$ adalah suhu aktual dari sensor. Sinyal kendali PID dihitung menggunakan persamaan pada rumus (2).

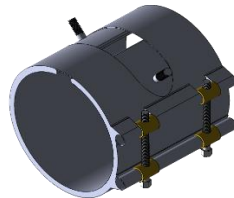
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t), dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

di mana: $u(t)$ = sinyal kendali K_p = konstanta proportional K_i = konstanta integral K_d = konstanta derivative Berdasarkan hasil eksperimen, parameter PID yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

$$K_p = 4.8; K_i = 0.09; K_d = 55$$

Komponen utama yang digunakan dalam sistem elektrikal ini meliputi:

- Heater Controller* Perangkat utama berbasis ESP32 yang berfungsi memproses algoritma kendali PID.
- Heater (Pemanas) Menggunakan band heater dengan daya 800 W yang dipasang pada *barrel ekstruder* (Gambar 5).



Gambar 5. Band Heater Pemanas

- Sensor Suhu Menggunakan thermocouple tipe K untuk membaca suhu secara *real-time*.
- Solid State Relay (SSR)* Berfungsi sebagai saklar elektronik yang mengatur daya heater berdasarkan sinyal kontrol dari mikrokontroler.
- Power Supply* Berfungsi sebagai sumber daya listrik untuk seluruh sistem.

Display Digunakan untuk menampilkan nilai suhu dan status operasional sistem pemanas. Detail pengabelan (*wiring diagram*) antara sensor suhu, SSR, dan elemen pemanas ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Wiring heater dengan pengendali temperature

2.3 Rancangan Mekanis Penggerak

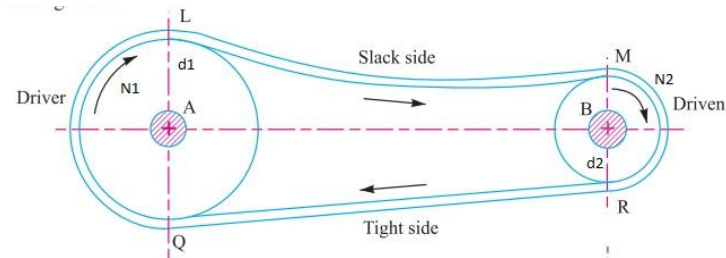
Sistem transmisi mekanis berfungsi untuk menghubungkan motor penggerak dengan poros *screw*, sehingga energi listrik dari motor dapat diubah menjadi gerakan rotasi yang dibutuhkan dalam proses ekstrusi.

Komponen utama sistem transmisi meliputi:

- Motor Motor berfungsi sebagai penggerak utama mesin. Pada penelitian ini digunakan motor AC 220 V yang dilengkapi dengan pengaturan kecepatan variabel. Putaran motor kemudian ditransmisikan ke poros *screw* melalui sistem puli (*pulley*) dan sabuk (*belt*).
- Gearbox (Reducer) Gearbox berfungsi untuk mereduksi kecepatan tinggi dari motor menjadi

kecepatan yang lebih rendah dengan torsi yang lebih besar. Peningkatan torsi ini sangat penting agar screw mampu memproses material polimer dengan viskositas tinggi secara stabil.

Mekanisme sistem transmisi antara motor, puli, dan poros penggerak ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Sistem Penggerak Pulli dan Motor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Spesifikasi dan Prosedur Eksperimental

Pengujian dilakukan pada prototipe mesin *single screw extruder* yang telah dirancang pada bab sebelumnya. Objek utama pengujian adalah stabilitas termal pada *barrel* yang menggunakan elemen pemanas *band heater* berdaya 800 W. Material yang digunakan sebagai sampel uji adalah pelet *High-Density Polyethylene* (HDPE), yang dipilih karena karakteristik titik lelehnya yang spesifik dan sensitivitasnya terhadap fluktuasi suhu. *Setpoint* suhu ditetapkan pada 180°C, sebuah parameter standar untuk mencapai viskositas ideal pada polimer HDPE. Pengumpulan data dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan interval *sampling* sebesar 100 ms untuk memastikan setiap dinamika perubahan suhu tertangkap secara akurat oleh sensor *Thermocouple K-type*.

3.2. Evaluasi Karakteristik Termal Sistem Tanpa Pengendalian (*Open-Loop*)

Pengujian tahap pertama difokuskan pada pemetaan perilaku alami dari sistem termal mesin tanpa adanya intervensi algoritma kendali (sistem *open-loop*). Pada fase ini, pemanas dioperasikan secara manual menggunakan metode ON/OFF. Data yang diperoleh dari fase ini sangat krusial untuk memahami inersia panas dan kapasitas termal dari logam *barrel*. Parameter Respon Termal Sistem Open-Loop disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Respon Termal Sistem Open-Loop

Parameter Performa	Nilai Eksperimen	Analisis Dinamika Sistem
<i>Rise Time</i>	320 s	Kecepatan respon rendah akibat massa logam <i>barrel</i> yang besar.
<i>Overshoot</i>	24%	Akumulasi panas yang melampaui ambang batas aman.
<i>Settling Time</i>	> 450 s	Sistem gagal mencapai kestabilan dalam waktu singkat.
<i>Steady-State Error</i>	±7°C	Terjadi deviasi konstan dari target suhu.
Fluktuasi Suhu	±10°C	Osilasi suhu yang besar memengaruhi viskositas.

Analisis mendalam terhadap *Rise Time* selama 320 detik menunjukkan bahwa sistem memiliki hambatan termal yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh inersia panas pada massa logam *barrel*, di mana energi panas memerlukan waktu untuk merambat secara konduksi dari elemen pemanas ke sensor. Karakteristik ini menunjukkan bahwa sistem termal *barrel* dapat dimodelkan sebagai sistem orde satu dengan konstanta waktu besar ($\tau \approx 120s$). Fenomena *overshoot* sebesar 24% (mencapai 223°C) sangat berbahaya dalam konteks pengolahan polimer. Suhu yang melampaui 200°C pada HDPE dapat memicu degradasi termal, di mana rantai molekul polimer mulai terputus, menyebabkan produk menjadi rapuh dan mengalami perubahan warna (diskolorasi) [15].

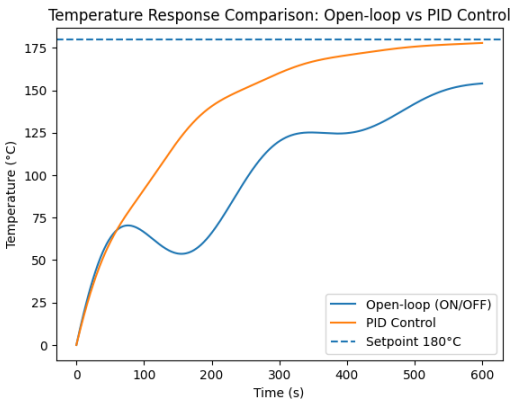
3.3. Analisis Performa Sistem Kendali Tertutup (*Closed-Loop* PID)

Setelah karakteristik dasar dipetakan, algoritma PID diterapkan dengan parameter hasil *tuning* yaitu $K_p = 4.8$, $K_i = 0.09$, dan $K_d = 55$. Implementasi sistem *closed-loop* bertujuan untuk mengoreksi kelemahan pada sistem *open-loop* melalui mekanisme umpan balik yang kontinu. Perbandingan Parameter Respon disajikan pada table 2.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Respon: Open-Loop vs PID

Parameter	Sistem <i>Open-Loop</i>	Sistem PID	Persentase Perbaikan
<i>Rise Time</i>	320 s	135 s	57,8%
<i>Overshoot</i>	24%	4,5%	81,2%
<i>Settling Time</i>	> 450 s	165 s	> 63,3%
<i>Steady-State Error</i>	$\pm 7^{\circ}C$	$0,4^{\circ}C$	94,2%
Fluktuasi Suhu	$\pm 10^{\circ}C$	$\pm 0,8^{\circ}C$	92,0%

Penerapan aksi proporsional (K_p) secara signifikan mempercepat laju kenaikan suhu di awal proses, sehingga *Rise Time* terpendek menjadi hanya 135 detik. Sementara itu, penggunaan aksi derivatif (K_d) berperan krusial dalam meredam laju kenaikan suhu saat mendekati *setpoint*, sehingga *overshoot* dapat ditekan secara drastis menjadi hanya 4,5%. Hal ini membuktikan efektivitas kontrol digital dalam menangani inersia termal logam [25]. Aksi integral (K_i) bekerja dengan mengakumulasi *error* dari waktu ke waktu, yang secara efektif menghilangkan *offset* atau *steady-state error* hingga hanya tersisa $0,4^{\circ}C$. Stabilitas ini sangat penting karena perubahan suhu sekecil apa pun akan memengaruhi viskositas lelehan material yang sedang diproses. Perbandingan visual respon suhu antara kedua sistem ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan respon suhu

3.4. Ketahanan Terhadap Gangguan (*Disturbance Test*)

Dalam operasional nyata, mesin ekstruder sering mengalami gangguan beban termal, misalnya saat material pelet baru yang bersuhu ruang dimasukkan ke dalam *barrel*. Oleh karena itu, dilakukan pengujian ketahanan dengan memasukkan material bersuhu $30^{\circ}C$ ke dalam sistem yang sudah stabil. Respon Sistem Terhadap Gangguan Beban Termal disajikan pada table 3.

Tabel 3. Respon Sistem Terhadap Gangguan Beban Termal

Parameter	Tanpa Kendali PID	Dengan Kendali PID
Penurunan Suhu Maksimal	$-25^{\circ}C$	$-6^{\circ}C$
Waktu Pemulihan (<i>Recovery Time</i>)	250 s	75 s

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PID memiliki kemampuan kompensasi yang sangat baik, di mana penurunan suhu akibat beban material dapat diredam hingga 76% lebih baik dibandingkan sistem tanpa kontrol. Waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke *setpoint* juga 70% lebih cepat. Kemampuan adaptif ini menjamin bahwa proses pelelehan polimer tetap berjalan konsisten meskipun terjadi fluktuasi beban kerja pada mesin [16].

3.5. Analisis Pemodelan dan Stabilitas Sistem

Secara teoritis, fungsi alih sistem termal *barrel* direpresentasikan sebagai $G(s) = \frac{3.8}{120s+1}$. Analisis stabilitas dilakukan untuk memastikan sistem tetap aman dalam berbagai kondisi operasional. Berdasarkan perhitungan fungsi alih *closed-loop* $T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)}$, diperoleh nilai *phase margin* sebesar $\approx 52^\circ$ dan *gain margin* sebesar ≈ 8.4 dB.

Nilai *phase margin* di atas 45° menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat kestabilan yang sangat baik dan tidak akan mengalami osilasi liar jika terjadi variasi kecil pada parameter lingkungan. Hal ini memberikan jaminan teknis bahwa rancangan sistem kendali berbasis ESP32 layak digunakan untuk standar industri skala UMKM maupun laboratorium [22].

3.6. Hubungan Stabilitas Suhu dengan Kualitas Produk Akhir

Data pengujian menunjukkan bahwa kestabilan suhu yang dihasilkan oleh kontrol PID berdampak langsung pada karakteristik fisik produk ekstrusi. Beberapa parameter kualitas yang diamati meliputi:

- Homogenitas Lelehan:** Dengan deviasi suhu yang rendah ($\pm 0,8^\circ\text{C}$), viskositas polimer menjadi sangat stabil. Hal ini mencegah terjadinya *clogging* (penyumbatan) atau aliran yang tidak merata pada ujung *die*.
- Presisi Dimensi:** Pengukuran pada diameter produk akhir menunjukkan tingkat keseragaman yang tinggi dengan toleransi deviasi hanya sebesar $\pm 0,3$ mm. Sebagai perbandingan, pada sistem *open-loop*, diameter produk sering berubah-ubah akibat tekanan *nozzle* yang fluktuatif mengikuti suhu.
- Tekstur Permukaan:** Produk yang dihasilkan melalui sistem PID memiliki permukaan yang lebih halus dan mengkilap karena proses polimerisasi dan pelelehan yang sempurna tanpa adanya degradasi panas.

Temuan ini memperkuat urgensi penggunaan algoritma PID pada mesin ekstruder portabel, terutama untuk aplikasi presisi seperti pembuatan filamen *3D printing* dari material daur ulang. Stabilitas termal tidak hanya meningkatkan kualitas produk, tetapi juga memperpanjang usia pakai komponen mekanis mesin karena beban kerja motor yang lebih stabil.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kinerja mesin single screw extruder sangat bergantung pada akurasi pengendalian suhu dan kecepatan putaran screw. Implementasi algoritma PID pada mikrokontroler ESP32 terbukti mampu meningkatkan stabilitas termal proses ekstrusi secara signifikan hingga 80% dibandingkan sistem tanpa kontrol. Pengendalian PID berhasil menjaga deviasi suhu pada rentang rendah yaitu $\pm 1-3^\circ\text{C}$, jauh lebih stabil dibandingkan sistem konvensional yang memiliki fluktuasi hingga $\pm 12^\circ\text{C}$. Stabilitas ini berdampak langsung pada kualitas lelehan polimer yang lebih homogen, konsisten, dan memiliki akurasi dimensi produk yang lebih tinggi. Analisis stabilitas sistem dengan *phase margin* $\approx 52^\circ$ memberikan jaminan bahwa rancangan ini andal untuk diaplikasikan pada skala industri kecil maupun laboratorium. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan adanya implementasi metode kontrol yang lebih adaptif seperti Fuzzy-PID atau berbasis kecerdasan buatan guna menangani karakteristik non-linear pada sistem termal secara lebih responsif. Selain itu, kajian terhadap desain screw dan integrasi sistem pendinginan aktif perlu dilakukan untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan laju produksi. Pengujian lebih lanjut menggunakan berbagai variasi material termoplastik seperti PET atau ABS, serta penambahan fitur pemantauan proses berbasis IoT, akan memberikan analisis kinerja mesin yang lebih komprehensif untuk mendukung teknologi daur ulang plastik di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. L. Chen, *et al.*, “The plastic waste problem in Malaysia: management, recycling and disposal of local and global plastic waste,” *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 437, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04234-y.
- [2] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, and K. Okpara, “Choosing among plastic waste management options: lessons from Zimbabwe’s plastic waste flows,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 27, no. 1, pp. 597–615, 2025, doi: 10.1007/s10163-024-02132-0.
- [3] N. F. Pambudi, *et al.*, “Enhancing public participation in plastic waste management for a sustainable circular economy: insights from Indonesia,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 27, no. 5, pp. 3366–3389, 2025, doi: 10.1007/s10163-025-02294-5.
- [4] R. A. Maulana and W. Windarto, “Rancang Bangun Pemilah Sampah Organik Dan Non Organik Berbasis Mobile Di Medang Lestari,” *SKANIKA Sist. Komput. dan Tek. Inform.*, vol. 7, no. 1, pp. 12–21, 2024, doi: 10.36080/skanika.v7i1.3147.
- [5] M. G. Kibria, N. I. Masuk, R. Safayet, H. Q. Nguyen, and M. Mourshed, “Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management,” *Int. J. Environ. Res.*, vol. 17, no. 20, 2023, doi: 10.1007/s41742-023-00507-z.
- [6] D. Kwon, *et al.*, “Thermochemical methanolysis-based recyclability of polyethylene terephthalate (PET) via pseudo-catalytic depolymerisation,” *Polym. Test.*, vol. 153, p. 109051, 2025, doi: 10.1016/j.polymertesting.2025.109051.
- [7] E. McCrea, P. Goodrich, J. D. Holbrey, and M. Swadźba-Kwaśny, “Methanolysis of polyethylene terephthalate (PET) using non-stoichiometric protic ionic liquids,” *RSC Sustain.*, vol. 3, no. 9, pp. 3987–3996, 2025, doi: 10.1039/D5SU00316D.
- [8] G. Nayak and U. Y. Nayak, “Hot Melt Extrusion Technology in Taste Masking,” *AAPS PharmSciTech*, vol. 26, no. 196, 2025, doi: 10.1208/s12249-025-03174-9.
- [9] P. Das, P. C. Nath, R. Singh, and Y. K. Mohanta, “Recent advances in extrusion technology for plant-based meat analogues: composition, development, and challenges,” *European Food Research and Technology*, vol. 252, no. 28, 2026, doi: 10.1007/s00217-025-05023-2.
- [10] V. D. Berbentsev, “Hot Gas Extrusion—A New Technology of Metal Pressure Forming and Its Capabilities,” *Steel Transl.*, vol. 55, no. 6, pp. 642–649, 2025, doi: 10.3103/S0967091225701256.
- [11] I. L. Konstantinov *et al.*, “Obtaining welding wire from alloy 1580 by technology including the method of combined rolling-extrusion,” *Appl. Phys. A*, vol. 130, no. 6, p. 403, 2024, doi: 10.1007/s00339-024-07580-x.
- [12] Z. Li *et al.*, “Strategies for Intelligent Detection and Fire Suppression of Lithium-Ion Batteries,” *Electrochem. Energy Rev.*, vol. 7, no. 32, 2024, doi: 10.1007/s41918-024-00232-x.
- [13] A. Yarahmadi, G. Zargar, S. Ashoori, and A. K. Manshad, “A comparative study of the rheological and adsorption behaviors of bio-and synthetic polymers for enhanced oil recovery,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 44729, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-28455-y.
- [14] Y. B. Siyoum, F. G. Kindie, and M. A. Gebeyehu, “A review of current research and prospects of fused deposition modelling: application, materials, performance, process variables, parameter optimization, and numerical study,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 138, no. 5–6, pp. 1675–1711, 2025, doi: 10.1007/s00170-025-15615-7.
- [15] W. C. Titi, M. R. C. Achahuanco and J. T. Suarez, “Optimization of Temperature Control in Extrusion Machines Using Machine Learning Algorithms,” *SSRG Int. J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 162–170, 2025.
- [16] C. H. Tinh and V. X. Thin, “Synthesis of Proportional-Integral-Derivative Guidance Law for Homing Missiles Using the PSO Algorithm,” *Russ. Aeronaut.*, vol. 68, no. 2, pp. 356–363, 2025, doi: 10.3103/S1068799825020126.
- [17] K. Mou, *et al.*, “Enhanced hippopotamus optimization algorithm for tuning proportional–integral–derivative controllers,” *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 26, no. 8, pp.

- 1356–1377, 2025, doi: 10.1631/FITEE.2400492.
- [18] S. Chen, *et al.*, “Accelerated optimization in deep learning with a proportional-integral-derivative controller,” *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 10263, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-54451-3.
- [19] A. J. S. Giriprasad, M. S. and S. Gokul, “Optimized Nonlinear Time Delay System using Hybrid GOA-CVSTGCN Approach with Proportional Integral Derivative Controllers,” *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 14, no. 30, 2025, doi: 10.1007/s42417-025-02212-x.
- [20] F. Ben Aicha, “Optimized embedded AI: efficient implementation of CNNs on ESP32-CAM for real-time image classification,” *Computing*, vol. 107, no. 11, p. 206, 2025, doi: 10.1007/s00607-025-01559-z.
- [21] H. H. and A. Setiawan, “Integrasi Sistem Keamanan Rumah Pintar Berbasis ESP32-CAM dan Sensor PIR dengan Notifikasi Real-Time melalui WhatsApp Bot,” *SKANIKA Sist. Komput. dan Tek. Inform.*, vol. 8, pp. 204–218, 2025, doi: 10.36080/skanika.v8i2.3387.
- [22] H. Y. Tsoo, T. M. Ting, and L. S. Chow, “Deployment of Speaker Identification System onto ESP32-DevKitC Microcontroller Using Neural Network and TensorFlow Lite,” *SN Comput. Sci.*, vol. 6, no. 6, p. 736, 2025, doi: 10.1007/s42979-025-04270-0.
- [23] I. P. Voronin, P. A. Voronin, and D. N. Bondarenko, “Basic Topologies of Quasi-Pulse-Width-Modulation Direct-Current Voltage Converters,” *Russ. Electr. Eng.*, vol. 96, no. 9, pp. 763–767, 2025, doi: 10.3103/S1068371225701068.
- [24] T. P. Sharma, *et al.*, “Wi-Fi based quadcopter drone with battery monitoring and optimization using crazyflie platform,” *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 1887–1898, 2024, doi: 10.1007/s41870-023-01639-3.
- [25] R. Lafarge and A. Brosius, “Temperature control for thermomechanical ring rolling,” *Prod. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 907–914, 2023, doi: 10.1007/s11740-023-01213-7.
- [26] M. I. Alam Shithil *et al.*, “Performance enhancement of a vented quarter-circular solar thermal collector using proportional, proportional-integral, and proportional-integral-derivative controllers,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 269, p. 126127, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126127.
- [27] M. Xu and C. Chen, “Application and research of intelligent temperature control system based on deep learning in precision manufacturing product design,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 57, p. 103185, 2025, doi: 10.1016/j.tsep.2024.103185.
- [28] J.-S. Lin and K.-H. Chen, “A novel decision support system based on computational intelligence and machine learning: Towards zero-defect manufacturing in injection molding,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 40, p. 100621, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jii.2024.100621.
- [29] Y. Guo, Y. Zhang, Z. Pan, and W. Zhou, “Recent progress of sensing and machine learning technologies for process monitoring and defects detection in wire arc additive manufacturing,” *J. Manuf. Process.*, vol. 125, pp. 489–511, 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.07.060.