

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

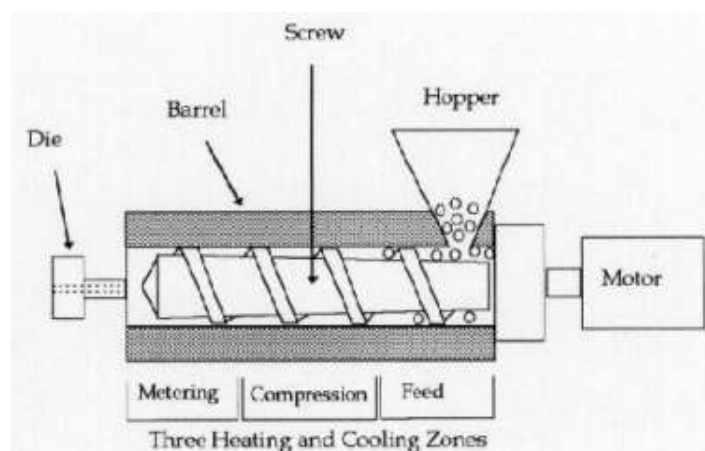
Extruder merupakan salah satu teknologi utama dalam pemrosesan polimer yang banyak digunakan di industri plastik untuk menghasilkan lelehan polimer secara kontinu dan homogen. Dalam proses ini, biji plastik (*pellets*) dilelehkan melalui kombinasi pemanasan dan disipasi energi mekanik yang timbul akibat aliran viskos material, sehingga terbentuk lelehan polimer dengan tingkat keseragaman tinggi dan laju produksi yang relatif besar. Mekanisme tersebut memungkinkan proses pelelehan berlangsung secara efisien sekaligus meminimalkan ketidakaturan temperatur di dalam sistem (Edeleva et al., 2023). Proses ekstrusi dinilai lebih efektif dibandingkan metode pemanasan konvensional karena pelelehan polimer terjadi pada lapisan material yang relatif tipis dan terus diperbaharui, sehingga dapat mengurangi gradien temperatur yang berlebihan serta menekan potensi degradasi material selama proses berlangsung (Mount, 2017).

2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Extruder

Extruder merupakan mesin yang secara mekanis sederhana, di mana sebuah sekrup satu bagian (*one-piece screw*) yang berputar secara kontinu di dalam *barrel* mampu menghasilkan lelehan (*melt*) berkualitas baik serta tekanan tinggi yang stabil sehingga keluaran material menjadi konsisten (Luker, 2012). Karakteristik tersebut, yang dikombinasikan dengan biaya investasi relatif rendah dan kebutuhan perawatan minimal, menjadikan *extruder* banyak

digunakan dalam berbagai proses produksi ekstrusi, meskipun memiliki keterbatasan dalam kemampuan pencampuran karena sebagian besar elemen pencampur tambahan bekerja setelah material mengalami pelelehan (Luker, 2012). Dari sudut pandang teknik, kinerja extruder dianalisis berdasarkan pola aliran, laju aliran, distribusi waktu tinggal, serta konsumsi daya sebagai fungsi dari desain sekrup dan kecepatan rotasinya, dengan perilaku aliran yang berbeda antara fluida Newtonian dan fluida non-Newtonian bertipe *power law* (Bruin et al., 1978).

Prinsip kerja *extruder* melibatkan proses berkesinambungan yang dimulai dari pengumpanan material padat, dilanjutkan dengan kompresi yang memaksa partikel membentuk aglomerasi di bawah tekanan tinggi sebelum dan selama proses pelelehan, serta deformasi geser (*shear deformation*) yang terjadi sepanjang lintasan material di dalam *barrel* (Luker, 2012). Mekanisme pelelehan tersebut dapat dijelaskan melalui pendekatan prediktif berbasis prinsip fisika fundamental, di mana interaksi antara panas dan gaya geser berperan dalam mengubah material padat menjadi lelehan homogen (Halmos et al., 1976).



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Extruder

2.2 Faktor yang Memengaruhi Ekstrusi

Proses ekstrusi dipengaruhi oleh beberapa parameter utama yang berperan penting dalam menentukan efisiensi proses, kualitas produk, serta karakteristik hasil ekstrusi. Parameter tersebut meliputi jenis ekstrusi, temperatur kerja, reduksi luas penampang, dan kondisi gesekan. Pemahaman yang baik terhadap faktor-faktor ini sangat diperlukan untuk mengoptimalkan proses ekstrusi pada berbagai jenis material dan aplikasi (Kalpakjian & Schmid, 2014).

2.2.1 Jenis Ekstrusi

Pemilihan jenis ekstrusi merupakan aspek penting dalam perancangan dan pengoperasian mesin ekstrusi karena berpengaruh langsung terhadap mekanisme aliran material dan kebutuhan gaya dorong. Secara umum, ekstrusi dapat diklasifikasikan menjadi ekstrusi langsung (*direct extrusion*) dan ekstrusi tidak langsung (*indirect extrusion*). Pada ekstrusi langsung, material didorong menuju saluran keluaran yang tetap, sedangkan pada ekstrusi tidak langsung, elemen pembentuk keluaran bergerak relatif terhadap material. Masing-masing metode memiliki karakteristik aliran dan efisiensi gaya yang berbeda, sehingga pemilihannya disesuaikan dengan sifat material, kebutuhan deformasi, serta stabilitas aliran yang diinginkan. Dalam praktiknya, ekstrusi langsung lebih banyak digunakan karena konstruksinya sederhana dan mudah diintegrasikan ke dalam sistem mesin ekstrusi berkelanjutan (Kalpakjian & Schmid, 2014).

2.2.2 Temperatur Kerja

Temperatur kerja merupakan parameter utama yang menentukan kemampuan alir material selama proses ekstrusi. Temperatur yang memadai memungkinkan material mengalami deformasi atau pelelehan secara efektif sehingga aliran dapat berlangsung stabil dengan kebutuhan gaya yang lebih rendah. Setiap material memiliki rentang temperatur operasi yang optimal, di mana sifat alirnya mendukung proses ekstrusi tanpa menyebabkan degradasi atau penurunan kualitas produk. Oleh karena itu, pengendalian temperatur menjadi faktor penting dalam mencapai kondisi proses yang efisien dan menghasilkan produk dengan karakteristik yang konsisten (Kalpakjian & Schmid, 2014).

2.2.3 Reduksi Luas Penampang

Reduksi luas penampang dalam proses ekstrusi dinyatakan melalui rasio ekstrusi, yaitu perbandingan antara luas penampang material sebelum dan sesudah melewati saluran keluaran. Rasio ekstrusi memengaruhi tingkat deformasi, distribusi aliran, serta sifat mekanik produk hasil ekstrusi. Rasio yang lebih besar umumnya meningkatkan tingkat regangan material, yang dapat berdampak pada perubahan sifat mekanik dan kualitas permukaan produk. Oleh karena itu, penentuan rasio ekstrusi harus mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan deformasi dan kemampuan mesin dalam menghasilkan aliran yang stabil (Kalpakjian & Schmid, 2014).

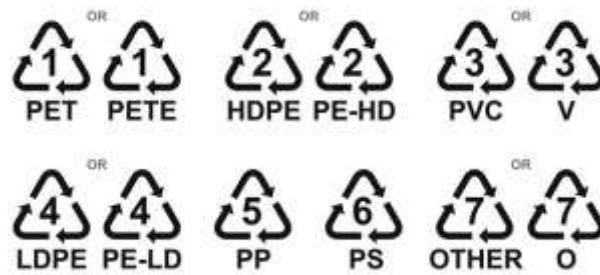
2.2.4 Gesekan

Gesekan yang terjadi antara material dan permukaan saluran ekstrusi merupakan faktor penting yang memengaruhi kebutuhan daya, kestabilan aliran, serta kualitas permukaan produk. Gesekan yang tinggi dapat meningkatkan beban ekstrusi dan mempercepat keausan komponen mesin, sehingga pengendalian gesekan melalui pemilihan material, desain saluran, dan pengaturan kondisi operasi menjadi hal yang krusial. Selain itu, interaksi antara gesekan, temperatur kerja, dan kecepatan ekstrusi secara simultan menentukan performa keseluruhan proses ekstrusi (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Selain faktor-faktor tersebut, interaksi antarparameter juga perlu diperhatikan. Kecepatan ekstrusi dan kondisi gesekan, misalnya, dapat secara simultan memengaruhi kualitas produk dan umur cetakan. Selain itu, temperatur awal, kecepatan ekstrusi, dan faktor gesekan saling berkaitan dalam menentukan beban ekstrusi total.

2.3 Karakteristik Plastik Termoplastik

Plastik merupakan material utama dalam proses ekstrusi, sehingga karakteristiknya berpengaruh langsung terhadap kestabilan proses dan kualitas produk yang dihasilkan. Pemahaman mengenai jenis dan sifat plastik diperlukan untuk memastikan kesesuaian material dengan sistem pemanasan dan kondisi operasi *extruder*.



Gambar 2. 2 Kode Plastik

2.3.1 Polyethylene Terephthalate (PET)

Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan plastik termoplastik berbasis poliester yang dikenal memiliki kekuatan tarik tinggi, transparansi yang baik, serta ketahanan terhadap gas. PET secara luas digunakan pada botol minuman, kemasan makanan, dan serat tekstil. Meskipun PET memiliki sistem daur ulang yang relatif mapan, volume penggunaannya yang besar dan umur pakai yang singkat, khususnya pada kemasan minuman, menjadikannya kontributor utama limbah plastik pascakonsumsi (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 3 Plastik (PET)

2.3.2 High-Density Polyethylene (HDPE)

High-Density Polyethylene (HDPE) memiliki struktur molekul yang lebih rapat dibandingkan LDPE, sehingga menghasilkan material yang lebih kaku, kuat, dan tahan terhadap bahan kimia. HDPE banyak digunakan dalam produk seperti botol deterjen, wadah kimia, pipa, dan kontainer industri. Sifat mekanik yang baik dan stabilitas kimia menjadikan HDPE sebagai salah satu plastik komoditas utama dengan potensi daur ulang yang relatif lebih tinggi dibandingkan plastik fleksibel (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 4 High-Density Polyethylene (HDPE)

2.3.3 Polyvinyl Chloride (PVC)

Polyvinyl Chloride (PVC) merupakan plastik dengan sifat mekanik yang baik, tahan terhadap cuaca, dan dapat dimodifikasi menjadi kaku atau fleksibel melalui penambahan aditif. PVC banyak digunakan pada sektor konstruksi seperti pipa, profil bangunan, dan pelapis kabel. Meskipun memiliki umur pakai yang panjang, keberadaan aditif menimbulkan tantangan tersendiri pada tahap pengelolaan limbah dan daur ulang (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 5 Polyvinyl Chloride (PVC)

2.3.4 Low-Density Polyethylene (LDPE)

Low-Density Polyethylene (LDPE/LLDPE) merupakan plastik dengan struktur molekul bercabang yang memberikan sifat fleksibel, ringan, dan tahan terhadap kelembapan. Material ini banyak digunakan pada kemasan fleksibel seperti kantong plastik dan film pembungkus. Umur pakai yang singkat serta tingkat daur ulang yang rendah menyebabkan LDPE berkontribusi signifikan terhadap akumulasi limbah plastik, khususnya dari produk sekali pakai (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 6 Low-Density Polyethylene (LDPE/LLDPE)

2.3.5 Polypropylene (PP)

Polypropylene (PP) adalah plastik berdensitas rendah dengan ketahanan termal dan kimia yang baik, sehingga banyak digunakan pada kemasan, peralatan rumah tangga, komponen otomotif, dan produk medis. Tingginya volume produksi dan konsumsi PP menjadikannya salah satu plastik komoditas utama dengan tantangan besar dalam pengelolaan limbahnya (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 7 Polypropylene (PP)

2.3.6 Polystyrene (PS)

Polystyrene (PS) merupakan plastik komoditas yang banyak digunakan pada produk kemasan dan barang konsumen dengan umur pakai relatif singkat, seperti peralatan makan sekali pakai dan material pelindung kemasan. Produksi dan penggunaan PS yang cukup luas, khususnya pada aplikasi kemasan, menyebabkan material ini berkontribusi signifikan terhadap timbunan limbah plastik pascakonsumsi. Selain itu, tingkat daur ulang PS secara global masih rendah, sehingga sebagian besar material ini berakhir di tempat pembuangan akhir atau terakumulasi di lingkungan. Kondisi tersebut menjadikan PS sebagai salah satu jenis plastik yang menimbulkan tantangan besar dalam sistem pengelolaan limbah plastik (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 8 Polystyrene (PS)

2.3.7 Jenis Plastik Lainnya

. Jenis plastik lainnya mencakup berbagai polimer teknik dan plastik khusus yang digunakan dalam aplikasi tertentu dengan volume produksi lebih kecil. Keragaman komposisi material pada kelompok ini menyebabkan proses pemilahan dan daur ulang menjadi lebih sulit, sehingga sebagian besar berakhir sebagai limbah residu (Geyer et al., 2017).



Gambar 2. 9 Jenis Plastik Lainnya

2.4 Karakteristik Termal dan Reologi Plastik

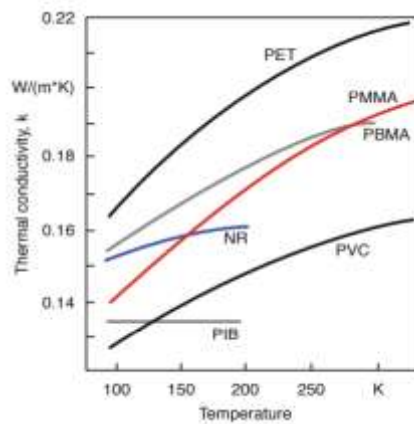
Karakteristik termal dan reologi plastik memiliki peranan penting dalam memahami perilaku material selama proses pengolahan serta potensi

penerapannya. Sifat-sifat ini menentukan respons plastik terhadap variasi suhu dan beban mekanik, sehingga berpengaruh langsung terhadap kesesuaian material untuk berbagai aplikasi industri. Karakteristik termal meliputi konduktivitas panas, ketahanan terhadap suhu, dan suhu transisi gelas, sedangkan karakteristik reologi berkaitan dengan perilaku aliran plastik ketika dikenai tegangan. Sifat-sifat tersebut dipengaruhi oleh struktur molekul polimer, komposisi material, serta kondisi proses, yang dapat direkayasa untuk memperoleh kinerja material sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

2.4.1 Sifat Termal Plastik

Sifat termal plastik merupakan faktor penting dalam analisis perpindahan panas dan perancangan komponen polimer. Parameter utama yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan plastik dalam menghantarkan panas adalah konduktivitas termal, yang berkaitan dengan mekanisme transport energi melalui getaran molekul. Nilai konduktivitas termal dipengaruhi oleh struktur molekul, jarak antar rantai polimer, serta kondisi fisis material seperti temperatur dan tekanan (Osswald & Menges, 2012).

Pada polimer amorf, konduktivitas termal umumnya meningkat seiring dengan kenaikan temperatur hingga mendekati temperatur transisi gelas (*glass transition temperature*, T_g). Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya mobilitas molekul yang memfasilitasi perpindahan energi panas. Namun, setelah melewati T_g , konduktivitas termal cenderung menurun akibat perubahan mekanisme transport panas pada kondisi di atas transisi gelas (Osswald & Menges, 2012).



Gambar 2. 10 Peningkatan konduktivitas termal seiring dengan peningkatan suhu (Osswald, T. A., & Menges, 2012).

Perilaku yang berbeda ditunjukkan oleh polimer semikristalin, di mana konduktivitas termal pada kondisi padat umumnya lebih tinggi dibandingkan kondisi leleh karena densitas dan keteraturan struktur molekul yang lebih besar. Ketika berada dalam keadaan leleh, nilai konduktivitas termalnya menurun dan mendekati nilai polimer amorf. Selain itu, peningkatan tekanan hidrostatik pada lelehan polimer dapat meningkatkan konduktivitas termal akibat bertambahnya densitas material (Osswald & Menges, 2012).

Selain pengaruh temperatur dan fasa, anisotropi akibat orientasi rantai polimer juga berperan penting dalam menentukan sifat termal plastik. Orientasi rantai yang terjadi selama proses pembentukan atau penarikan dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan pada arah orientasi tersebut, baik pada polimer semikristalin maupun amorf. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi proses manufaktur turut memengaruhi sifat termal akhir produk plastik (Osswald & Menges, 2012).

Tabel 2. 1 Temperatur Leleh Plastik

Material	°C	°F
ABS	180 – 240	356 – 464
Acetal	185 – 225	365 – 437
Acrylic	180 – 250	356 – 482
Nylon	260 – 290	500 – 554
Poly Carbonat	280 – 310	536 – 590
LDPE	160 – 240	320 – 464
HDPE	200 – 280	392 – 572
PET	260	500
PP	200 – 300	392 – 572
PS	180 – 260	356 – 500
PVC	160 – 180	320 – 365

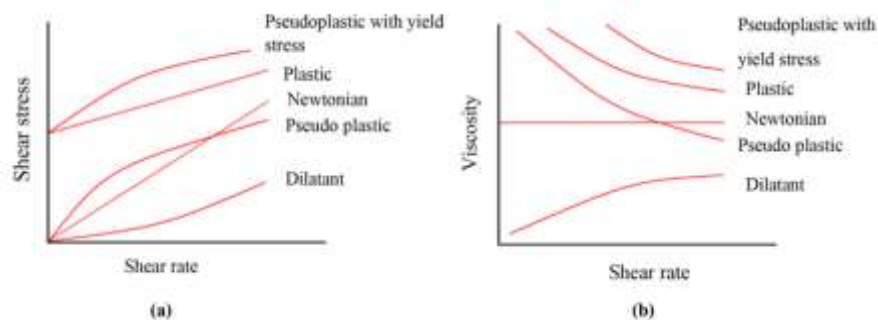
Suhu leleh plastik juga merupakan parameter penting dalam berbagai aplikasi proses daur ulang, dan pengolahan material. Setiap jenis plastik memiliki rentang suhu leleh yang berbeda, yang dipengaruhi oleh struktur kimia serta tujuan penggunaannya. Pemahaman terhadap karakteristik suhu leleh ini sangat diperlukan untuk mengoptimalkan proses manufaktur, menjaga stabilitas proses, dan memastikan kualitas produk yang dihasilkan. Perbedaan jenis plastik menyebabkan variasi suhu leleh yang cukup signifikan, sehingga pengaturan temperatur proses harus disesuaikan dengan material yang digunakan.

2.4.2 Sifat Reologi Plastik

Sifat reologi material menggambarkan perilaku aliran dan deformasi material ketika dikenai gaya, serta hubungan antara tegangan, regangan, dan waktu selama proses aliran berlangsung. Dalam kajian reologi fluida dan material semi-padat, salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengkarakterisasi perilaku tersebut adalah laju geser (*shear rate*), yang

menyatakan seberapa cepat lapisan-lapisan fluida mengalami pergeseran relatif selama mengalir. Laju geser berpengaruh langsung terhadap kemampuan material untuk bergerak dan menyebar, di mana fluida dengan viskositas tinggi cenderung mengalami hambatan aliran pada laju geser tertentu, sedangkan fluida dengan viskositas rendah dapat mengalir lebih mudah. Oleh karena itu, hubungan antara laju geser dan viskositas merupakan aspek kunci dalam analisis reologi material (Megalingam et al., 2022).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa viskositas fluida sangat dipengaruhi oleh laju geser, khususnya pada sistem *semi-solid metal processing* (SSMP). Perubahan laju geser selama proses deformasi menyebabkan perubahan perilaku aliran yang dapat diamati melalui kurva aliran (*flow curve*), yang merepresentasikan hubungan antara tegangan geser, laju geser, dan viskositas. Kurva aliran ini digunakan sebagai alat utama dalam kajian reologi untuk mengklasifikasikan jenis perilaku fluida serta memahami respons material terhadap kondisi aliran yang berbeda (Megalingam et al., 2022).



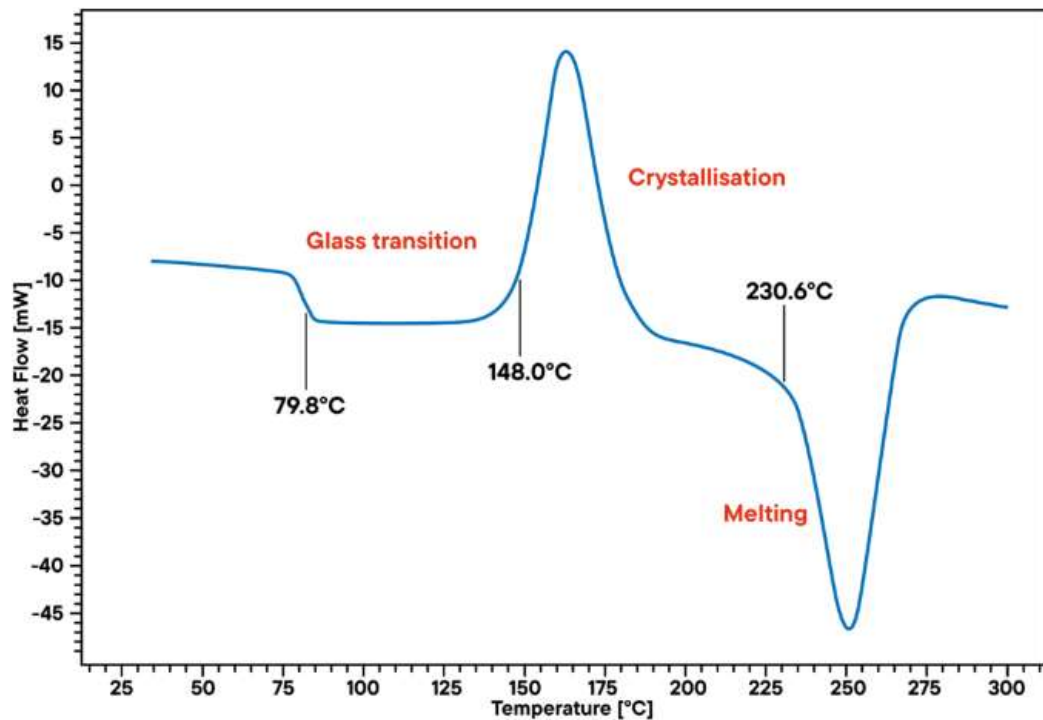
Gambar 2. 11 Perilaku reologi pada (A) tegangan geser dan (B) viskositas terhadap laju geser (Megalingam et al., 2022).

Berdasarkan karakteristik reologinya, fluida dapat diklasifikasikan menjadi fluida Newtonian dan non-Newtonian. Fluida Newtonian menunjukkan viskositas yang konstan pada berbagai laju geser sehingga hubungan antara tegangan geser dan laju geser bersifat linear. Sebaliknya, pada fluida non-Newtonian, perubahan laju geser menyebabkan perubahan viskositas akibat interaksi antarpartikel atau molekul yang memengaruhi mekanisme perpindahan energi selama aliran. Dalam kondisi tertentu, seperti pada tegangan geser yang tinggi, fluida yang semula berperilaku Newtonian dapat menunjukkan kecenderungan non-Newtonian, yang menegaskan pentingnya analisis reologi dalam memahami perilaku aliran material (Megalingam et al., 2022).

2.5 Temperature Transisi Plastik PET

Berdasarkan Gambar 2.12 hasil pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dari rujukan Linseis, temperatur transisi leleh (*melting temperature* atau T_m) pada polimer *Polyethylene Terephthalate* (PET) dapat diidentifikasi secara spesifik melalui puncak endotermik yang ditunjukkan oleh kurva lembah menukik tajam ke bawah. Proses pelelehan material ini mulai terdeteksi pada titik awal (*onset temperature*) di suhu **230,6 °C**, di mana energi termal dari sistem mulai cukup untuk memecah ikatan struktur padat molekul PET. Penyerapan panas maksimal terjadi tepat pada titik puncak terendah kurva di suhu **250 °C**, yang merupakan titik leleh utama dari plastik PET tersebut. Pada rentang suhu transisi ini, susunan struktur kristal yang sebelumnya terbentuk pada fase kristalisasi (148,0 °C) akan melebur secara menyeluruh, sehingga material kehilangan kekakuan fisiknya dan mengalami perubahan wujud dari

fase padat menjadi cairan kental (*viscous melt*).



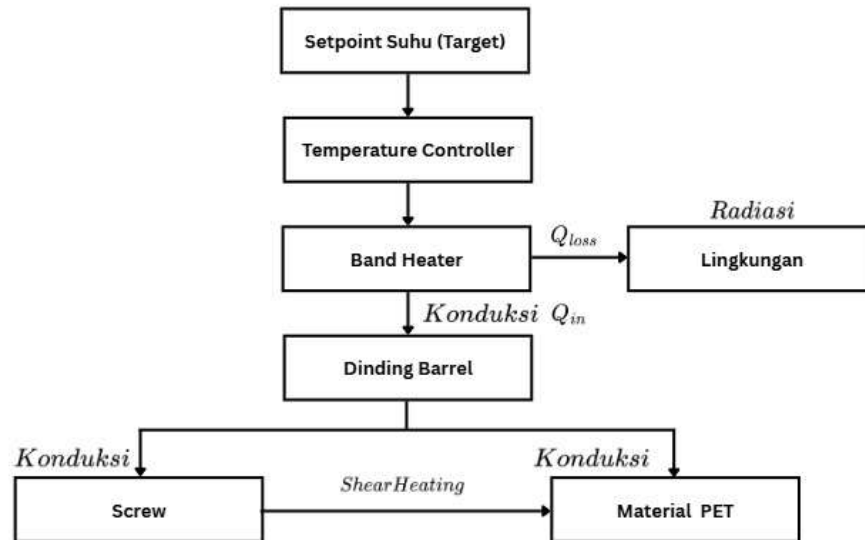
Gambar 2. 12 Perilaku hasil pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) (Linseis Thermal Analysis, 2026).

2.6 Model Sistem Heater Terhadap Barrel

Energi panas yang dihasilkan oleh band heater disalurkan ke dinding barrel melalui mekanisme konduksi akibat adanya kontak langsung antara kedua komponen. Dinding barrel kemudian menjadi media penghantar panas menuju material PET sehingga material mengalami peningkatan temperatur secara bertahap hingga mencapai kondisi leleh. Selain itu, sebagian panas juga dihantarkan ke screw melalui mekanisme konduksi.

Selama proses ekstrusi, putaran screw menghasilkan shear heating akibat gaya geser pada material PET. Panas tambahan ini mendukung proses pelelehan

sehingga distribusi temperatur pada material menjadi lebih merata. Namun, tidak seluruh energi panas dari band heater dimanfaatkan oleh sistem karena sebagian energi terlepas ke lingkungan melalui mekanisme radiasi.

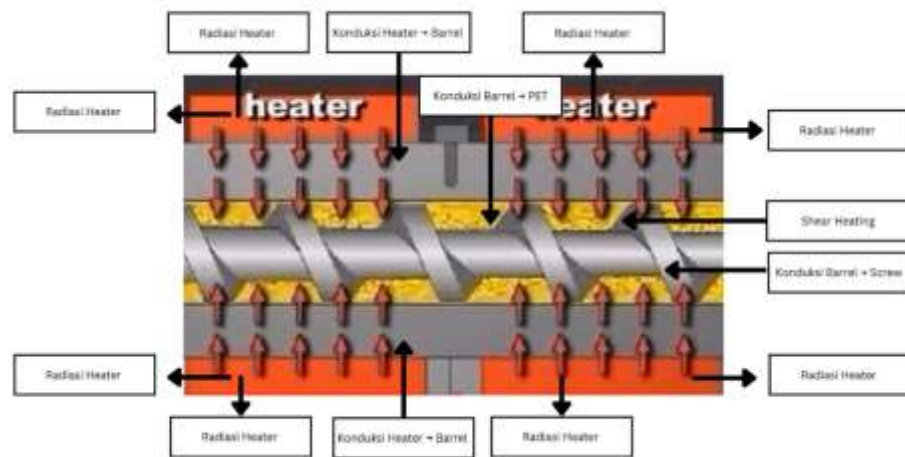


Gambar 2. 13 Model Sistem Heater Terhadap Barrel

2.7 Model Proses Heater Terhadap Barrel

Proses perpindahan panas pada mesin ekstruder diawali ketika thermo controller mengatur suhu band heater sesuai dengan nilai setpoint yang telah ditentukan. Band heater kemudian mentransfer panas ke dinding barrel melalui mekanisme konduksi. Selanjutnya, panas dari dinding barrel diteruskan secara konduksi ke material PET sebagai jalur utama proses pelelehan, sedangkan sebagian panas juga berpindah ke screw sehingga suhu screw ikut meningkat.

Selain panas yang berasal dari band heater, putaran screw menghasilkan shear heating, yaitu panas akibat gaya geser yang terjadi pada material PET selama proses ekstrusi. Di sisi lain, sebagian energi panas dari band heater hilang ke lingkungan melalui mekanisme radiasi sehingga tidak seluruh energi



panas dimanfaatkan untuk memanaskan material PET.

Gambar 2. 14 Model Proses Heater Terhadap Barrel

2.8 Dasar Perhitungan Mesin Pencetak Biji Plastik Daur Ulang

Dasar perhitungan Mesin Pencetak Biji Plastik Daur Ulang berfungsi sebagai landasan teknis dalam proses perancangan agar mesin mampu bekerja secara optimal, efisien, dan aman. Perhitungan ini berperan dalam memastikan kesesuaian antara kebutuhan proses dan kemampuan mesin, sehingga kinerja sistem dapat tercapai secara maksimal. Selain itu, dasar perhitungan juga berfungsi untuk mengendalikan kualitas hasil ekstrusi, meningkatkan keandalan komponen, serta meminimalkan risiko kegagalan selama pengoperasian mesin.

2.8.1 Proses *Feeding*

Pada *feed section*, material plastik dimasukkan ke dalam ekstruder melalui hopper dan umumnya mengalir secara gravitasi menuju barrel. Material kemudian menempati ruang annular di antara sekrup dan dinding barrel yang membentuk saluran sekrup (*screw channel*). Pada tahap ini, barrel berada dalam kondisi diam sementara sekrup berputar, sehingga timbul gaya gesek antara material dengan permukaan barrel dan sekrup. Gaya gesek tersebut berperan utama dalam mendorong material padat bergerak maju sepanjang barrel selama material masih berada di bawah titik lelehnya. Namun, tidak semua material memiliki kemampuan alir yang baik dalam kondisi kering, sehingga pada beberapa kasus diperlukan upaya khusus untuk mencegah terjadinya penyumbatan atau *bridging* di dalam hopper (Rauwendaal, 2014).

2.8.1.1 Volume Hopper Kerucut Terpancung

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Volume Hopper Kerucut

Terpancung mengutip dari (Olagunju, O. 2024):

$$V_h = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h (r^2 + rR + R^2) \quad (2.1)$$

Dimana :

V_h = Volume Hopper (mm³)

h = Tinggi Hopper (mm)

r = Jari Jari Lingkaran Bawah Hopper (mm)

R = Jari Jari Lingkaran Atas Hopper (mm)

2.8.1.2 Kapasitas Hopper

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kapasitas Hopper mengutip dari (Kasyafullah, M. S., & Suryaman. 2023).:

$$m_h = V_h \cdot \rho_{PET} \quad (2.2)$$

Dimana :

m_h = Kapasitas Hopper (kg)

V_h = Volume Hopper (mm³)

ρ_{PET} = Densitas PET (g/cm³)

2.8.1.3 Energi Sensibel

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Energi Sensibel mengutip dari (Çengel & Ghajar, 2015) :

$$Q_1 = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

Dimana :

Q_1 = Energi Sensibel (J)

m = Massa Material Plastik (kg)

C_p = Kalor Jenis Material Plastik (J/kg·K)

T_2 = Suhu Akhir Material (°C atau K)

T_1 = Suhu Awal Material (°C atau K)

2.8.1.4 Energi Laten

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Energi Laten mengutip dari (Çengel & Ghajar, 2015):

$$Q_2 = m \cdot H_f \quad (2.4)$$

Dimana :

Q_2 = Energi Laten Peleburan (J)

m = Massa Material Plastik (kg)

H_f = Kalor Laten Lebur Material (J/kg)

2.8.1.5 Energi Total Pemanasan

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Energi Total Pemanasan mengutip dari (Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J., 2015):

$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2 \quad (2.5)$$

Dimana :

Q_{Total} = Energi Total Pemanasan (J)

Q_1 = Energi Sensibel (J)

Q_2 = Energi Laten Peleburan (J)

2.8.1.6 Kebutuhan Daya Teoritis

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kebutuhan Daya Teoritis mengutip dari (Khurmi & Gupta, 2005) :

$$P_{Teoritis} = \frac{Q_{Total}}{t} \quad (2.6)$$

Dimana :

$$P_{Teoritis} = \text{Daya Teoritis Pemanas (W)}$$

$$Q_{Total} = \text{Energi Total Pemanasan (J)}$$

$$t = \text{Waktu Pemanasan (s)}$$

2.8.1.7 Daya Aktual

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kebutuhan Daya Aktual :

$$P_{Actual} = \frac{P_{Teoritis}}{\eta} \quad (2.7)$$

Dimana :

$$P_{Actual} = \text{Daya Aktual Pemanas (W)}$$

$$P_{Teoritis} = \text{Daya Teoritis (W)}$$

$$\eta = \text{Efisiensi Sistem Pemanas}$$

2.8.1.8 Jumlah Plat Heater

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Jumlah Plat Heater:

$$n = \frac{P_{actual}}{P_{heater}} \quad (2.8)$$

Dimana :

n = Jumlah Elemen Pemanas

P_{Actual} = Daya Aktual Pemanas (W)

P_{heater} = Daya Elemen Pemanasan (W)

2.8.1.9 Perpindahan Panas Konduksi

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Perpindahan Panas Konduksi :

$$Q = \frac{2\pi kL (T_o - T_i)}{\ln(\frac{r_o}{r_i})} \quad (2.9)$$

Dimana :

Q = Laju Perpindahan Panas (W)

k = Konduktivitas Termal Baja Karbon

L = Panjang Barrel

T_o = Temperatur Permukaan Luar Barrel (°C)

T_i = Temperatur Permukaan Dalam Barrel (°C)

r_o = Jari-Jari Luar Barrel

r_i = Jari-Jari Dalam Barrel

2.8.1.10 Penurunan Temperatur

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Penurunan Temperatur :

$$\Delta T = P_{heater} \cdot R \quad (2.10)$$

Dimana :

ΔT = Penurunan Temperatur (°C)

P_{heater} = Daya Heater (W)

$$R = \text{Hambatan Termal Silinder (K/W)}$$

2.8.2 Proses Compression

Seiring pergerakan material ke arah depan, material mengalami pemanasan akibat kombinasi panas gesek yang dihasilkan oleh interaksi mekanik dengan sekrup serta panas yang dihantarkan dari pemanas barrel. Ketika temperatur material melampaui titik lelehnya, lapisan lelehan (*melt film*) mulai terbentuk pada permukaan barrel. Pada kondisi ini, zona pengangkutan padatan berakhir dan proses pelelehan atau *plasticating* dimulai. Perlu dicatat bahwa awal terjadinya pelelehan tidak selalu bertepatan dengan awal zona kompresi secara geometris, karena batas zona fungsional sangat dipengaruhi oleh sifat material, desain mesin, dan kondisi operasi. Sepanjang zona ini, jumlah material padat secara bertahap berkurang hingga seluruh material berada dalam kondisi leleh (Rauwendaal, 2014).

2.8.2.1 Volume Ekstruder

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Volume Ekstruder 1 Putaran :

$$V_{1n} = (A_{Barrel} - A_{Screw}) \cdot L \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{4} \pi (d_b^2 - d_s^2) \cdot L \quad (2.12)$$

Dimana :

$$V_{1n} = \text{Volume Satu Putaran Screw (m}^3\text{)}$$

A_{Barrel}	=	Luas Penampang Dalam Barrel (m ²)
A_{Screw}	=	Luas Penampang Poros Screw (m ²)
L	=	Panjang Zona Ekstruder (mm)
d_b^2	=	Diameter Dalam Barrel (mm)
d_s^2	=	Diameter Poros Screw (mm)

2.8.2.2 Kapasitas Produksi

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kapasitas Produksi mengutip dari (Kasyafullah & Suryaman, 2023) :

$$\dot{m}_{30} = V_{1n} \cdot n_{Screw} \cdot \rho_{PET} \quad (2.13)$$

Dimana :

$\dot{m}_{30}$	=	Kapasitas Produksi Massa (kg/jam)
V_{1n}	=	Volume Satu Putaran Screw (m ³)
n_{Screw}	=	Putaran Screw (rpm)
ρ_{PET}	=	Densitas Material PET (g/cm ³)

2.8.2.3 Gaya Dorong Ekstruder

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kapasitas Produksi mengutip dari (Sholih et al., 2023) :

$$F = P_{Max \text{ in Barrel}} \cdot A_{Die} \quad (2.14)$$

$$P \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_d^2}{4} \right) \quad (2.15)$$

Dimana :

F	=	Gaya Dorong Ekstruder (N)
-----	---	---------------------------

$P_{Max\ in\ Barrel}$ = Tekanan Maksimum di Dalam Barrel
pada Die (Pa)

A_{Die} = Luas Penampang Die (m²)

d_d^2 = Diameter Lubang Die (mm)

2.8.2.4 Torsi Screw

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Torsi Screw :

$$T = F \cdot L_{Screw} \quad (2.16)$$

Dimana :

T = Torsi Screw (N·m)

F = Gaya Dorong Ekstruder (N)

L_{Screw} = Panjang Screw (mm)

2.8.2.5 Daya Motor Screw

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Daya Motor Screw :

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T \quad (2.17)$$

Dimana :

P = Daya Motor Screw (W)

n = Putaran Screw (rpm)

T = Torsi Screw (N·m)

2.8.2.6 Daya Motor Screw Aktual

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Daya Motor Screw Aktual :

$$\frac{P_{Motor\ Screw}}{P_{Motor\ 1\ HP}} \quad (2.18)$$

Dimana :

$$P_{Motor\ Screw} = \text{Daya Motor Screw (W)}$$

$$P_{Motor\ 1\ HP} = \text{Daya Motor 1 HP (W)}$$

2.8.2.7 Pemilihan Rasio Gearbox

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Rasio Gearbox mengutip dari (Budynas & Nisbett, 2011)

$$i = \frac{n_{Motor\ Screw\ 1.5\ HP}}{n_{Max\ Screw}} \quad (2.19)$$

Dimana :

$$i = \text{Rasio Gearbox}$$

$$n_{Motor\ Screw\ 1.5\ HP} = \text{Putaran Motor Screw 1.5 HP (rpm)}$$

$$n_{Max\ Screw} = \text{Putaran Maksimal Screw (rpm)}$$

2.8.2.8 Efisiensi Gearbox

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Efisiensi Gearbox mengutip dari (Yericsen et al., 2023) :

$$\eta = \frac{P_{Out}}{P_{In}} \quad (2.20)$$

$$\frac{T_{Screw} \cdot n_{Max\ Screw}}{T_{Motor} \cdot n_{Max\ Motor}} \quad (2.21)$$

Dimana :

η	=	Efisiensi Gearbox
P_{Out}	=	Daya Keluaran Gearbox (W)
P_{In}	=	Daya Masukan Gearbox (W)
T_{Screw}	=	Torsi Pada Screw (N·m)
T_{Motor}	=	Torsi Motor (N·m)
$n_{Max Screw}$	=	Putaran Maksimal Screw (rpm)
$n_{Max Motor}$	=	Putaran Maksimal Motor (rpm)

2.8.2.9 Torsi Motor Screw Setelah Gearbox

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Torsi Motor Screw Setelah Gearbox mengutip dari (Lynch et al., 2016) :

$$T_s = T_{Motor Screw} \cdot i \cdot \eta_{Gearbox} \quad (2.22)$$

Dimana :

T_s	=	Torsi Setelah Gearbox (N.m)
$T_{Motor Screw}$	=	Torsi Motor Screw (N.m)
i	=	Rasio Gearbox
$\eta_{Gearbox}$	=	Efisiensi Gearbox

2.8.2.10 Kekuatan Motor Terhadap Putaran Screw

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kekuatan Motor Terhadap Putaran Screw :

$$T_s \geq T_{Screw} \quad (2.23)$$

Dimana :

T_s = Torsi Setelah Gearbox (N.m)

T_{Screw} = Torsi Screw (N.m)

2.8.3 Proses Metering

Setelah seluruh material plastik berada dalam kondisi leleh, aliran memasuki *metering section* atau zona pengaliran lelehan. Pada tahap ini, lelehan polimer dipompa secara kontinu menuju cetakan (*die*) dengan kondisi aliran yang relatif stabil dan homogen. Ketika lelehan mengalir melalui die, material akan mengikuti bentuk saluran alir die sehingga menghasilkan penampang produk sesuai dengan geometri cetakan. Karena die memberikan hambatan terhadap aliran, diperlukan tekanan tertentu untuk mendorong material melewatinya, yang dikenal sebagai *diehead pressure*. Besarnya tekanan ini ditentukan oleh desain die, laju aliran, temperatur lelehan, serta sifat reologi material, sedangkan ekstruder berfungsi menghasilkan tekanan yang cukup untuk mengatasi hambatan tersebut (Rauwendaal, 2014).

2.8.3.1 Debit Volumetrik Lelehan

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Debit Volumetrik Lelehan mengutip dari (Fox et al., 2011):

$$Q = \frac{\dot{m}_{Total}}{\rho_{PET}} \quad (2.24)$$

Dimana :

Q = Debit Volumetrik Lelehan (m^3/s)

$\dot{m}_{Total}$ = Laju Aliran Massa Total (Kg/s)

ρ_{PET} = Densitas PET (g/cm^3)

2.8.3.2 Luas Penampang Die

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Luas Penampang Die mengutip dari (Kreyszig, E., 2011):

$$A_{Die} = \frac{\pi \cdot d_d^2}{4} \quad (2.25)$$

Dimana :

A_{Die} = Luas Penampang Die (m^2)

d_d^2 = Diameter Die (mm)

2.8.3.3 Kecepatan Keluar Lelehan

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Luas Penampang Die mengutip dari (Fox et al., 2011):

$$v_{out} = \frac{Q}{A_{Die}} \quad (2.26)$$

Dimana :

v_{out} = Kecepatan Keluar Lelehan (m/s)

Q = Debit Volumetrik (m^3/s)

A_{Die} = Luas Penampang Die (m^2)

2.8.3.4 Panjang Potongan

Target ukuran produk ditetapkan sebesar **2-5 mm** menyerupai pelet plastik komersial guna memastikan keseragaman dimensi, kemudahan proses feeding, serta stabilitas pada tahap pendinginan dan pemotongan. Ukuran ini dipilih untuk mendukung konsistensi kualitas dan efisiensi proses ekstrusi. (Santos, I.R., et al., 2009).

2.8.3.5 Putaran Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Putaran Pisau mengutip dari (Rauwendaal, C., 2014):

$$n_{Pisau} = \frac{v_{Keluar\ Lelehan}}{Z_{Pisau} \cdot l_{Potongan}} \quad (2.27)$$

Dimana :

n_{Pisau} = Putaran Pisau (rps)

$v_{Keluar\ Lelehan}$ = Kecepatan Keluar Lelehan (m/s)

Z_{Pisau} = Jumlah Mata Pisau

$l_{Potongan}$ = Panjang Potongan (mm)

2.8.3.6 Kecepatan Potong Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kecepatan Potong Pisau mengutip dari (Kalpakjian & Schmid, 2014):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{Pisau\ Keseluruhan} \cdot l_{Potongan}}{60} \quad (2.28)$$

Dimana :

v_c = Kecepatan Potong Pisau (m/s)

$D_{Pisau\ Keseluruhan}$ = Diameter Pisau Keseluruhan (mm)

$l_{Potongan}$ = Panjang Potongan (mm)

2.8.3.7 Gaya Potong Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Gaya Potong Pisau mengutip dari (White, F. M., 2016):

$$F_c = P_{Max\ in\ Barrel} \cdot A_{Die} \quad (2.29)$$

Dimana :

F_c = Gaya Potong Pisau (N)

$P_{Max\ in\ Barrel}$ = Tekanan Maksimum di dalam Barrel
pada Die (Pa)

A_{Die} = Luas Penampang Die (mm)

2.8.3.8 Torsi Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Torsi Pisau mengutip dari (Budynas & Nisbett, 2015):

$$T_{Pisau} = F_{Potong\ pisau} \cdot r_{Total\ Pisau} \quad (2.30)$$

Dimana :

T_{Pisau} = Torsi Pisau (N.m)

$F_{Potong\ pisau}$ = Gaya Potong Pisau (N)

$r_{Total\ Pisau}$ = Jari-Jari Pisau Keseluruhan (mm)

2.8.3.9 Daya Motor Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Daya Motor Pisau mengutip dari (Ramadhan et al., 2023):

$$P_{Pisau} = 2 \cdot \pi \cdot n_{Pisau} \cdot T_{Pisau} \quad (2.31)$$

Dimana :

$$P_{Pisau} = \text{Daya Motor Pisau (W)}$$

$$n_{Pisau} = \text{Putaran Pisau (rps)}$$

$$T_{Pisau} = \text{Torsi Pisau (N.m)}$$

2.8.3.10 Daya Motor Pisau Aktual

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Daya Motor Pisau Aktual :

$$\frac{P_{Motor\ Pisau}}{P_{Motor\ 1\ HP}} \quad (2.32)$$

Dimana :

$$P_{Motor\ Pisau} = \text{Daya Motor Pisau (W)}$$

$$P_{Motor\ 1\ HP} = \text{Daya Motor 1 HP (W)}$$

2.8.3.11 Kekuatan Motor Terhadap Putaran Pisau

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Kekuatan Motor Terhadap Putaran Pisau :

$$T_s \geq T_{Pisau} \quad (2.33)$$

Dimana :

$$T_s = \text{Torsi Setelah Gearbox (N.m)}$$

$$T_{Pisau} = \text{Torsi Pisau (N.m)}$$

2.8.3.12 Volume Satu Pelet Biji Plastik

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Volume Satu Pelet Biji Plastik mengutip dari (Kreyszig, E., 2011):

$$V_p = A_{Die} \cdot l_c \quad (2.34)$$

Dimana :

$$V_p = \text{Volume Satu Pelet Biji Plastik (m}^3\text{)}$$

$$A_{Die} = \text{Luas Penampang Die (mm)}$$

$$l_c = \text{Panjang Potongan (mm)}$$

2.8.3.13 Massa Satu Pelet Biji Plastik

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Massa Satu Pelet Biji Plastik mengutip dari (Kreyszig, E., 2011):

$$m_p = \rho_{PET} \cdot V_p \quad (2.35)$$

Dimana :

$$m_p = \text{Massa Satu Pelet Biji Plastik (Kg)}$$

$$\rho_{PET} = \text{Densitas PET (g/cm}^3\text{)}$$

$$V_p = \text{Volume Satu Pelet Biji Plastik (m}^3\text{)}$$

2.8.3.14 Jumlah Keluaran Pelet Biji Plastik

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Jumlah Keluaran Pelet Biji Plastik mengutip dari (Bird et al., 2002):

$$z_{p\ out} = \frac{\dot{m}_{Total}}{m_p} \quad (2.36)$$

Dimana :

$z_{p\ out}$ = Jumlah Keluaran Pelet Biji Plastik
(Biji/s)

$\dot{m}_{Total}$ = Laju Aliran Massa Total (m/s)

m_p = Massa Satu Pelet Biji Plastik (Kg)

2.8.3.15 Total Kapasitas Keluaran Pelet Biji Plastik

Berikut adalah Rumus untuk menghitung Total Kapasitas Keluaran Pelet

Biji Plastik:

$$z_{p\ Out} \cdot m_{pelet} \quad (2.37)$$

Dimana :

$z_{p\ out}$ = Jumlah Keluaran Pelet Biji Plastik
(Biji/s)

m_{pelet} = Massa Satu Pelet Biji Plastik (Kg)

2.9 Penelitian Terdahulu

Rujukan utama yang diaplikasikan dalam menentukan spesifikasi kinerja mesin didasarkan pada studi yang dilakukan oleh Teguh Prayogo (2020). Dalam penelitian tersebut, dikaji mengenai spesifikasi teknis dan parameter operasional pada proses ekstrusi polimer. Hasil komprehensif dari studi tersebut diadaptasi sebagai referensi dasar untuk menetapkan spesifikasi nominal putaran *screw* (poros berulir) yang paling optimal, yakni pada rentang kecepatan 30 hingga 45 *Revolutions Per Minute* (RPM). Selain itu, penelitian ini juga mengkaji efektivitas proses pencetakan, yang kemudian diimplementasikan dalam

perancangan ini melalui penetapan dimensi *die nozzle* dengan diameter sebesar 3 milimeter guna menghasilkan produk keluaran yang ideal.

Sebagai penyempurna dalam aspek analitis, rujukan kedua yang menjadi fondasi perhitungan teknis perancangan ini adalah penelitian dari Kasyafullah dan Suryaman (2023). Literatur ini berkontribusi secara krusial terhadap aspek kuantitatif, khususnya dalam analisis mekanik dan kapasitas geometri dari desain mesin yang diusulkan. Formulasi yang dipaparkan dalam penelitian tersebut diadopsi sebagai kerangka acuan matematis utama untuk menentukan volume serta nilai kapasitas dari komponen *hopper* (corong pemasok material). Lebih lanjut, model matematis dari publikasi ini diaplikasikan untuk merumuskan perhitungan proyeksi kapasitas produksi massa material plastik. Penggunaan literatur ini memastikan bahwa spesifikasi mesin yang dirancang memiliki landasan perhitungan *engineering* yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademis.