

BAB II DASAR TEORI

Mesin *pultrusion* pada penelitian / perancangan ini digunakan untuk membentuk ulang (*reshaping*) material plastik PET hasil daur ulang botol minuman menjadi *filament* berdiameter 1,75 mm. Berbeda dengan proses ekstrusi konvensional yang melelehkan material, mesin *pultrusion* bekerja pada kondisi *solid-state deformation*, yaitu material dipanaskan hingga lunak (di atas suhu transisi gelas/ T_g namun di bawah suhu leleh/ T_m), kemudian ditarik secara kontinu melewati nozzle untuk memperoleh bentuk dan dimensi yang diinginkan.

Pendekatan ini dipilih karena konsumsi energi lebih rendah, degradasi termal PET dapat diminimalkan, serta konstruksi mesin relatif sederhana dan sesuai untuk skala kecil atau penelitian.

- Parameter lebar pita plastik (*Strip Width*)

Untuk menghasilkan filamen bulat sempurna dengan diameter $D_{\text{filamen}} = 1,75$ mm, volume material dari pita plastik harus sama dengan volume filamen yang dihasilkan. Ketebalan dinding botol PET (t) bervariasi. Oleh karena itu, lebar pita (W) harus dihitung secara presisi berdasarkan ketebalan botol tersebut. Rumus Pendekatan. Luas penampang pita (persegi panjang) harus sama dengan luas penampang filamen.

$$A_{\text{pita}} = A_{\text{filamen}}$$

$$W \times t = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

maka, rumus untuk mencari lebar pita (W) adalah :

$$W = \frac{\pi \times d^2}{4 \times t}$$

keterangan :

- W = Lebar pita potongan botol (mm)
- t = Ketebalan dinding botol PET (mm)
- d = Diameter filamen target (1,75 mm)
- Termodinamika dan Perpindahan Panas (*Heating Block & Nozzle*)

Pita PET harus dipanaskan hingga mencapai fase transisi gelas ($T_g = 75^\circ\text{C}$) dan mendekati atau mencapai titik lelehnya ($T_m = 200^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$) agar dapat dideformasi menjadi *filamen* melalui *nozzle*.

- a. Energi panas yang dibutuhkan (Q_{req})
Energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu PET dari suhu kamar ke suhu proses :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_{proses} - T_{awal})$$

dimana :

- Q = Laju aliran panas (Watt atau J/s)
- m = Laju massa PET yang ditarik (kg/s)
$$m = p \cdot A \cdot v$$
- p = Densitas PET ($= 1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

- A = Luas penampang *filamen* (m²)
- v = Kecepatan penarikan / *pulling speed* (m/s)
- C_p = Kapasitas panas spesifik PET (J/kg.°C)
- T_{proses} = Suhu *nozzle* (200 °C – 250 °C)
- T_{awal} = Suhu ruangan (27 °C – 30 °C)

b. Pemilihan Elemen Pemanas (*Heater Cartridge*)

Karena ada rugi - rugi panas (*heat loss*) ke udara sekitar melalui konveksi dan radiasi, daya *heater* aktual (P_{heater}) harus diberi faktor keamanan (S_f 1.5 - 2) :

$$P_{heater} = Q \times S_f$$

- Mekanika Penarikan (*Pulling Mechanism*) dan Perhitungan Motor.

Mekanisme penarikan biasanya menggunakan *extruder gear* (MK8/MK7) atau roda karet yang ditekan, yang digerakkan oleh Motor *Stepper* (misal Nema 17) atau Motor DC *Geared*.

a. Gaya Tarik (*Pulling Force - Fp*)

Gaya tarik diperlukan untuk mengatasi gaya gesek (*friction*) antara pita PET dengan dinding dalam *nozzle* saat proses deformasi terjadi. Gaya ini dapat diukur secara eksperimen atau didekati dengan tegangan luluh material pada suhu tinggi. Secara praktis, gaya tarik (F_p) berkisar antara 10 N hingga 40 N tergantung suhu.

b. Torsi motor yang dibutuhkan (T)

Torsi pada roda penarik/poros penggulung dihitung dengan :

$$T = F_p \times r \times S_f$$

dimana :

- T = Torsi motor (Nm)
- F_p = Gaya tarik (N)
- r = Jari-jari gulungan filamen (m)
- S_f = Faktor keamanan (*safety factor*, 1.5 - 2)

c. Kecepatan putar motor (N)

Untuk mencapai kecepatan penarikan (v) yang diinginkan :

$$v = \omega \times r = \frac{2\pi N \times r}{60}$$

$$N = \frac{60 \cdot v}{2\pi \cdot r}$$

dimana :

- N = Kecepatan putar motor (rpm)
- v = Kecepatan penarikan filamen (m/s)
- r = Jari-jari roda penarik (m)

2.1 Fungsi Mesin *Pultrusion*

Secara umum, mesin *pultrusion* PET memiliki beberapa fungsi utama sebagai berikut :

1. Membentuk ulang material PET, Mengubah bentuk awal PET (*strip* hasil potongan botol dengan penampang

persegi panjang) menjadi *filament* berbentuk silinder dengan diameter standar (1,75 mm).

2. Menjaga kontinuitas dan keseragaman dimensi, proses penarikan kontinu memastikan diameter *filament* relatif stabil sepanjang waktu operasi.
3. Memanfaatkan deformasi padat (*solid-state*), material PET tidak dilelehkan sepenuhnya, sehingga sifat mekanik dasar material lebih terjaga dan degradasi akibat panas dapat dikurangi.
4. Mendukung proses daur ulang, mesin ini berfungsi sebagai bagian dari sistem pemanfaatan ulang limbah botol PET menjadi bahan baku baru, misalnya untuk filament pencetakan 3D.

2.2. Prinsip Kerja Mesin *Pultrusion*

Prinsip kerja mesin *pultrusion* didasarkan pada kombinasi pemanasan terkontrol dan gaya tarik mekanik. Alur prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pemasukan Material (*Feeding*), material PET hasil potongan botol dengan ukuran awal tertentu (misalnya tebal 0,25 mm dan lebar 9,5 mm) dimasukkan secara kontinu ke arah *nozzle*.
2. Pemanasan (*Heating Zone*), material melewati *nozzle* yang dipanaskan hingga suhu sekitar 210 °C. Pada suhu ini, PET berada pada kondisi lunak, sehingga mudah dideformasi tanpa mencair sepenuhnya. Panjang *nozzle* sebesar 10 mm berfungsi sebagai zona lunak (*heated zone*) tempat terjadinya deformasi.
3. Pembentukan di *nozzle*, berfungsi sebagai cetakan yang mengubah penampang awal material menjadi penampang lingkaran. Karena luas penampang awal dan

- akhir relatif sama, proses ini lebih dominan sebagai perubahan bentuk daripada proses penarikan (*drawing*).
4. Penarikan (*Pulling Mechanism*), material yang telah dibentuk ditarik oleh sepasang *roller* penarik yang digerakkan motor *stepper*. Kecepatan *roller* (misalnya $n = 2$ rpm dengan diameter *roller* 50 mm) menentukan kecepatan tarik linier *filament*.
 5. Pendinginan dan stabilisasi bentuk, setelah keluar dari *nozzle*, *filament* mulai mendingin oleh udara sekitar, sehingga bentuk dan diameter yang telah dibentuk menjadi stabil sebelum digulung atau ditampung.

2.3. Mekanisme Utama Mesin

1. Sistem Pemanas *Nozzle*

Sistem pemanas berfungsi menaikkan dan mempertahankan suhu *nozzle* pada nilai yang diinginkan (sekitar 210 °C). Daya heater yang relatif kecil (sekitar 30 W) sudah mencukupi karena laju alir material rendah dan proses tidak memerlukan peleburan total. Kontrol suhu umumnya menggunakan sistem kontrol sederhana (misalnya PID) untuk menjaga kestabilan suhu.

2. Sistem Penarikan (*Roller* dan Motor)

Penarikan dilakukan oleh *roller* berdiameter 50 mm yang digerakkan motor *stepper* NEMA 17. Pada kecepatan $n = 2$ rpm, kecepatan tarik *filament* sekitar 5,24 mm/s. Sistem ini menghasilkan gaya tarik yang relatif kecil (sekitar beberapa newton), namun cukup untuk menarik PET yang telah dilunakkan di dalam *nozzle*.

3. Sinkronisasi Proses

Kestabilan proses *pultrusion* sangat bergantung pada sinkronisasi antara :

- suhu *nozzle*,
- kecepatan penarikan *roller*,
- dan kondisi permukaan *nozzle*.

Ketidakseimbangan antara parameter tersebut dapat menyebabkan cacat seperti diameter tidak seragam, permukaan kasar, atau terjadinya *necking* pada *filament*.

2.4 Karakteristik Operasi Mesin

Pada kondisi operasi yang telah dianalisis :

- Kecepatan *roller* : $n = 2$ rpm
- Kecepatan tarik : $\pm 5,24$ mm/s
- Laju alir massa : ± 1 gram/menit
- Output : $\pm 18,9$ meter *filament* per jam

Mesin bekerja pada kondisi stabil dengan beban mekanik dan termal yang relatif rendah, sehingga cocok untuk operasi jangka panjang dan eksperimen.