

ABSTRAKSI

Proses produksi yang efisien, merupakan salah satu tujuan dari manufakturing. Pada proses pencetakan plastik dengan menggunakan cetakan injeksi proses produksi yang efisien sulit dicapai, karena persiapan awal proses membutuhkan waktu yang cukup lama akibat metoda trial and error yang digunakan.

Sebelum melakukan analisa proses pencetakan jumlah cavity yang terdapat pada cetakan diperiksa terlebih dahulu, untuk mengetahui apakah cetakan yang digunakan sudah sesuai dengan kemampuan dari mesin injeksi yang digunakan. Analisa dan perhitungan proses pencetakan dilakukan untuk memperkirakan harga parameter-parameter yang dibutuhkan dalam proses pencetakan produk. Adapun parameter yang dibutuhkan dalam proses pencetakan adalah tekanan injeksi, gaya pencekaman, cycle time process, sistem pendinginan cetakan, dan gaya pelepasan produk yang dibutuhkan.

Dari hasil analisa diperoleh kesimpulan bahwa tekanan injeksi dan gaya pencekaman yang dibutuhkan untuk proses masih lebih kecil dibandingkan kemampuan mesin injeksi yang digunakan untuk proses pencetakan. Kapasitas pendinginan cetakan dapat menyerap jumlah panas yang timbul pada proses pencetakan, dan cycle time process relatif singkat yaitu 12,83 detik.

BAB II

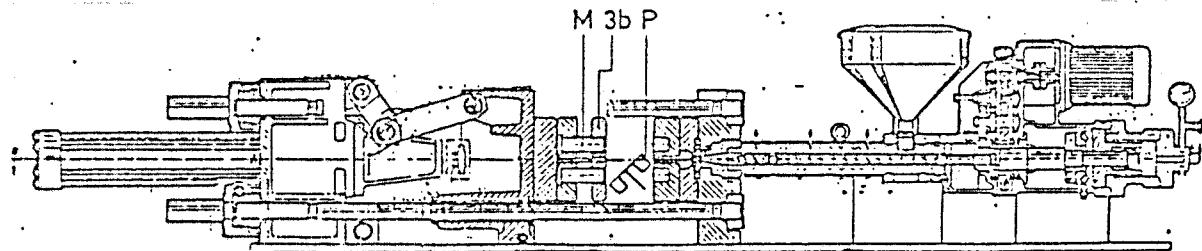
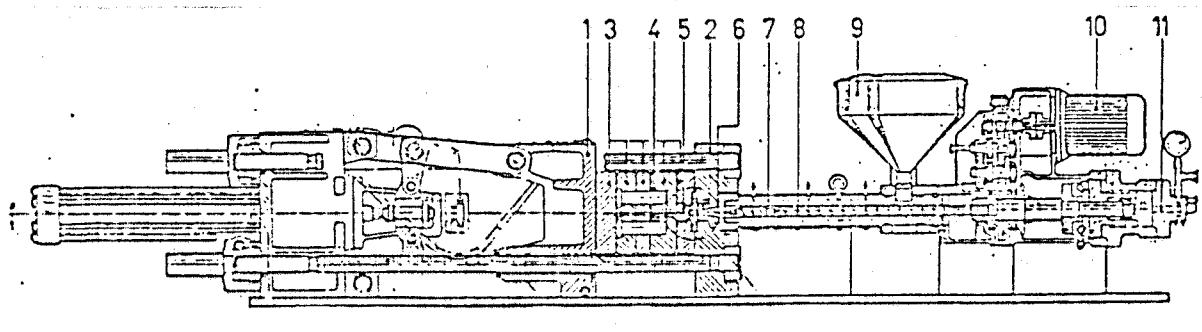
DASAR TEORI

2.1. Prinsip Kerja Cetakan Injeksi

Cetakan injeksi terdiri dari 2 bagian yaitu bagian yang dicekam pada plat tetap (*fix plate*) dan bagian yang dicekam pada plat bergerak (*moving plate*) dari mesin injeksinya. Cetakan yang dicekam pada *fix plate* umumnya berfungsi sebagai pembentuk dinding luar produk, sedang cetakan yang dicekam pada *moving plate* berfungsi sebagai pembentuk dinding dalam produk. Cetakan pembentuk dinding luar produk mempunyai sistem saluran *runner* untuk mengakomodasikan dan mendistribusikan cairan plastik dari nozel mesin injeksi, sedang pada cetakan pembentuk dinding dalam produk terdapat komponen - komponen mekanisme pengeluaran produk.

Proses pembentukan produk pada cetakan injeksi ini diawali dengan memanaskan bahan baku plastik sampai melampaui temperatur lelehnya. Pemanasan ini dilakukan dalam *barrel* yang pada dinding sebelah luarnya dipasang beberapa elemen pemanas dengan pengaturan makin mendekati nozel, makin tinggi temperaturnya, sehingga pada saat mencapai nozel plastik sudah mencair seluruhnya. Cairan plastik tadi kemudian diinjeksikan dengan tekanan tinggi kedalam rongga

cavity dari cetakan. Adanya sistem pendingin didalam cetakan menyebabkan cairan plastik akan membeku setelah beberapa saat, dan membentuk produk sesuai dengan rongga cavity. Kemudian mekanisme pengeluaran akan mengeluarkan bekuan plastik yang sudah merupakan produk itu dari dalam cetakan. Setelah itu moving plate akan maju, cetakan menutup kembali, dan siap untuk penginjeksian berikutnya.



- 1. MOVING PLATE
- 2. FIX PLATE
- 3. PLAT-2 MOULD
- 4. CAVITY
- 5. SPRUE
- 6. NOZZLE
- 7. BARREL
- 8. SCREW
- 9. HOPER
- 10. MOTOR PEMUTAR SCREW
- 11. PISTON

M (mold)
P (product)
3b (stripper plate)

Gambar. 2.1. Skematik mesin injeksi

2.2. Jumlah Cavity

Cavity adalah rongga didalam cetakan yang dibentuk sesuai dengan bentuk dan dimensi produk yang akan dibuat. Cavity merupakan bagian yang penting dalam sebuah cetakan, sebab dalam cavity ini terjadi proses pembentukan produk. Kualitas suatu produk ditentukan oleh kualitas cavitynya, oleh karena itu kehalusan permukaan cavity dan kepresision dari setiap bagian cavity harus benar - benar diperhatikan.

Secara teknis, jumlah cavity pada suatu cetakan ditentukan oleh kemampuan dari mesin injeksinya. Ada dua hal yang paling berpengaruh dalam menentukan jumlah cavity yaitu kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi dan gaya pencekaman mesin injeksi.

2.2.1. Jumlah Cavity Berdasarkan pada Kapasitas Maksimum

Volume Satu Langkah Injeksi (n_1)

Volume satu langkah injeksi adalah banyaknya cairan plastik, yang dapat diinjeksikan oleh ujung screw dalam satu kali langkah injeksi. Setiap mesin mempunyai batasan volume injeksi maksimal, dan untuk keamanan volume satu langkah injeksi harus lebih kecil dari 80 % volume injeksi maksimal mesin injeksi. Volume satu langkah injeksi pada cetakan hot runner adalah jumlah volume produk, karena cairan

plastik didalam saluran *runner* pada sistem ini tidak turut membeku.

Jumlah cavity berdasarkan pada kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi dinyatakan oleh persamaan 2.1.

$$n_1 = 0,8 \cdot \frac{V_s}{V_p} \quad (2.1)$$

dimana :

V_s : Kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi (m^3)

V_p : Volume satu produk (m^3).

Perhitungan diatas akan menghasilkan jumlah cavity maksimal, tetapi jumlah cavity tersebut harus diperiksa kembali apakah gaya pencekaman dari mesin memenuhi, jika tidak memenuhi, maka jumlah tersebut harus dikurangi.

2.2.2. Jumlah Cavity Berdasarkan Gaya Pencekaman Mesin

Injeksi (n_2).

Jumlah cavity maksimum dapat dicari dengan menggunakan gaya pencekaman maksimum dan tekanan injeksi maksimum dari mesin injeksi. Perumusan jumlah cavity berdasarkan gaya pencekaman maksimum dari mesin injeksi adalah :

$$n_2 = \frac{F_c \cdot sf}{A_p \cdot P_i} \quad (2.2)$$

dimana :

F_c : Gaya pencekaman maksimum mesin injeksi (N).

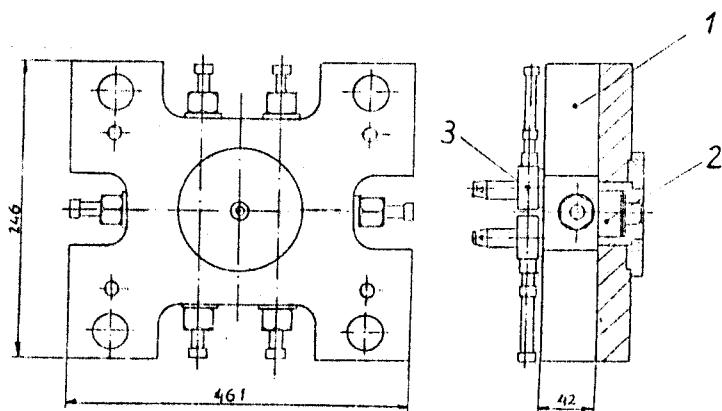
sf : Faktor keamanan (1,2 - 1,5).

A_p : Luas proyeksi produk (m^2).

P_i : Tekanan injeksi maksimum mesin injeksi (Pa).

Selain dua hal diatas jumlah cavity juga harus mempertimbangkan konstruksi dari mekanisme pengeluaran produk dan jarak antara tiang pengarah.

2.3. Hot Runner



Keterangan Gambar :

1. Manifold
2. Penghubung nozel
3. Hot tip

Gambar 2.2 Skematik Hot Runner

Sistem *hot runner* ini terdiri dari sebuah penghubung nozel, *manifold*, dan beberapa *hot tip*. Skematik dari sistem *hot runner* ini dapat dilihat pada gambar 2.2. Penghubung nozel adalah sejenis *sprue bush* yang mempunyai elemen pemanas. *Manifold* adalah sebuah plat yang menjadi rumah saluran *runner* dan diberi sistem pemanas. *Hot tip* merupakan perpanjangan *manifold* yang menuju ke rongga *cavity* dan mempunyai pemanas elemen tersendiri. Masing - masing sistem pemanas dapat diatur dan dikontrol oleh suatu alat kontrol, sehingga temperatur yang dikehendaki tetap konstan selama proses pencetakan produk berlangsung.

Temperatur sistem *hot runner* ini sama dengan temperatur proses yaitu temperatur cairan plastik pada saat keluar dari nozel. Penghubung nozel, *manifold*, dan *hot tip* harus diberi pemanasan awal dahulu yaitu dengan mengalirkan sejumlah arus listrik kedalam sistem. Arus listrik ini akan menghasilkan panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sistem *hot runner* ini dari temperatur kamar ke temperatur proses. Pemanasan awal ini diperhitungkan dengan banyaknya panas yang hilang karena perpindahan panas konduksi terhadap plat - plat yang bersentuhan dengan sistem *hot runner*, perpindahan panas konveksi dan radiasi untuk bagian dari sistem yang berhubungan dengan udara bebas.

Waktu pemanasan awal untuk sistem *hot runner* umumnya antara 30 menit sampai dengan 60 menit.

Keuntungannya :

- Dapat digunakan pada cetakan injeksi untuk produk dengan bentuk yang kompleks atau produk yang berdinding tipis.
- Lebih fleksibel dalam pemilihan *gate*, dan memungkinkan untuk penggunaan *gate katup*.
- Proses pencetakan dapat dengan mudah dilanjutkan kembali apabila proses dihentikan sejenak.

Kerugiannya :

- Harga sistem *hot runner* cukup mahal.

1. Laju pemanasan awal sistem *hot runner*

Perumusan laju pemanasan awal dari *manifold* dilihat pada persamaan 2.3.

$$Q_{hr} = \frac{[(m_{st} \times cp_{st}) + (m_p \times cp_p)] \times (T_m - T_k)}{t} \quad (2.3)$$

dimana :

Q_{hr} : Laju pemanasan awal *hot runner* (Watt)

m_{st} : Massa *hot runner* (kg)

cp_{st} : Panas spesifik material *hot runner* AISI H 13 (J/kg.°C)

m_p : Massa plastik dalam *hot runner* (kg)

c_p : Panas spesifik plastik polipropilen (J/kg.°C)
 T_m : Temperatur proses (°C)
 T_k : Temperatur kamar (°C)
 t : Lama waktu pemanasan *hot runner* dari T_k ke T_m (s)

2. Laju perpindahan panas yang hilang (q_L)

a. Manifold

Manifold mengalami kehilangan panas akibat perpindahan panas konveksi, radiasi, dan konduksi.

Perpindahan panas konveksi yang terjadi pada *Manifold* adalah konveksi bebas, jadi kecepatan udara disekitar cetakan sangat kecil dan diasumsikan mendekati nol. Koefisien perpindahan panas konveksi didapat dengan terlebih dahulu mencari bilangan Rayleigh (Ra_L) dan bilangan Nusselt (\overline{Nu}_L).

Bilangan Rayleigh (Ra_L)

Perumusan dari bilangan Rayleigh dapat dilihat pada persamaan 2.4.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_f - T_\infty) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \quad (2.4)$$

dimana :

g : Gaya gravitasi bumi (m^2/s)

$$T_f : \text{Temperatur film } (T_m + T_k) / 2 \quad (^\circ\text{K})$$

Bilangan Nusselt ($\overline{\text{Nu}}_L$)

Bilangan Nusselt dapat dihitung dari persamaan 2.5.

$$\overline{\text{Nu}}_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot \text{Ra}_L}{\left\{ 1 + (0,492 / \text{Pr}_a)^{9/16} \right\}^{4/9}} \quad (2.5)$$

dimana :

Pr_a : Bilangan Prandtl udara bebas pada 1 atm dan T_f

Koefisien perpindahan panas konveksi (h)

Perumusan koefisien perpindahan panas dapat dilihat pada persamaan 2.6.

$$h = \frac{\overline{\text{Nu}}_L \cdot k_a}{L} \quad (2.6)$$

dimana :

k_a : Koefisien konduktivitas panas udara pada 1 atmosfir
dan T_f $(\text{W/m.}^\circ\text{C})$

Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi (q_c)

Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dihitung dengan mengasumsikan aliran udara diatas permukaan cetakan mempunyai kondisi :

- Incompressible flow
- Kecepatan udara mendekati nol.

Perumusan laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dapat dilihat pada persamaan 2.7.

$$q_c = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

dimana:

A_s : Luas permukaan sisi *manifold* yang berhubungan dengan udara (m^2).

Laju perpindahan panas yang hilang karena radiasi (q_r)

Perumusan laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dapat dilihat pada persamaan 2.8.

$$q_r = \epsilon \cdot A_s \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.8)$$

dimana:

ϵ : Emisivitas material *hot runner*

σ : Konstanta Stefan Boltzman ($W/m^2 \cdot K^4$)

T_{sur} : Temperatur udara sekeliling ($^{\circ}K$)

Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dan radiasi (q_{cr})

Perumusan laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dan radiasi dapat dilihat dari persamaan 2.9.

$$q_{cr} = q_c + q_r \quad (2.9)$$

Laju perpindahan panas yang hilang karena konduksi (q_k)

Bagian *manifold* yang terkonduksi adalah permukaan plat samping kiri dan permukaan plat samping kanan. Plat insulasi dipasang pada kedua permukaan *manifold* untuk mengurangi panas yang hilang karena perpindahan panas konduksi. Asumsi-asumsi yang diambil agar perhitungan kehilangan panas dapat dilakukan adalah :

- Konduksi satu dimensi
- Sifat-sifat konstan.

$$q_k = \frac{1}{\sum R_{t,cond}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.10)$$

$$R_{t,cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.11)$$

dimana:

$R_{t,cond}$: Tahanan panas konduksi cetakan	(°C/W)
k	: Koefisien konduktivitas panas plat	(W/m.°C)
A	: Luas permukaan plat yang terkonduksi	(m ²)
L	: Tebal plat yang terkonduksi	(m)
T_1	: Temperatur <i>manifold</i>	(°C)
T_2	: Temperatur permukaan plat cetakan	(°C)

Berdasarkan persamaan (2.3) dan (2.11), dapat dihitung prosentase kehilangan panas karena konduksi pada

manifold. Perumusan dari prosentase kehilangan panas dapat dilihat pada persamaan 2.12.

$$\% q_k = \frac{q_k}{Q_{\text{man}}} \times 100 \% \quad (2.12)$$

dimana :

Q_{man} : Laju pemanasan awal *manifold* (Watt)

Rata - rata laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi, radiasi dan konduksi pada *manifold* ($q_{l,\text{man}}$)

$$q_{l,\text{man}} = \frac{q_{cr} + q_k}{2} \quad (2.13)$$

b. Penghubung nozel

Penghubung nozel hanya mengalami kehilangan panas karena konduksi, dan untuk mempermudah perhitungan kehilangan panas ini dilakukan dengan menggunakan prosentase kehilangan panas pada *manifold*. Perumusan kehilangan panas karena konduksi pada penghubung nozel dapat dilihat pada persamaan 2.14.

$$q_{l,pn} = \% q_k \times Q_{pn} \quad (2.14)$$

dimana :

Q_{pn} : Laju pemanasan awal penghubung nozel (Watt)

c. Hot tip

Seperti halnya penghubung nozel, hot tip juga hanya akan mengalami kehilangan panas karena konduksi, dan untuk mempermudah perhitungan kehilangan panas ini dilakukan dengan menggunakan prosentase kehilangan panas pada manifold.

3. Laju perpindahan panas total yang diperlukan selama pemanasan awal (Q_t)

Manifold

$$Q_{t,man} = Q_{man} + q_{l,man} \quad (2.15)$$

Penghubung nozel

$$Q_{t,pn} = Q_{pn} + q_{l,pn} \quad (2.16)$$

Hot tip

$$Q_{t,ht} = Q_{ht} + q_{l,ht} \quad (2.17)$$

Sistim Hot Runner Keseluruhan

$$Q_H = Q_{t,man} + Q_{t,pn} + Q_{t,ht} \quad (2.18)$$

2.4. Tekanan Injeksi

Tekanan injeksi adalah tekanan yang diperlukan agar produk dapat terbentuk dengan baik. Tekanan ini terjadi didalam cavity. Tekanan injeksi ini sulit dihitung secara

teliti, karena selama material mengalir terjadi perubahan viskositas akibat adanya perubahan - perubahan suhu, kondisi saluran distribusi *runner* dengan belokan - belokan yang ada, serta tipe *gate* yang digunakan.

Besarnya tekanan injeksi dari proses pencetakan produk dapat diperkirakan dengan menggunakan faktor ketebalan dinding produk. Faktor ketebalan dinding produk ini dapat dilihat pada tabel 2.1. Adapun parameter yang digunakan dalam perhitungan ini adalah :

1. Panjang *flow path*.
2. Tebal dinding produk.
3. Faktor viskositas material.

Tabel 2.1.Faktor ketebalan dinding produk (Mannesmann, 1982)

Tebal Dinding (mm)	Faktor Ketebalan Dinding Produk $F_{td} \text{ (N/cm}^3\text{)}$
0,5	100
0,6	70
0,7	57
0,8	45
0,9	35
1,0	30
1,1	26
1,2	21
1,3	18
1,4	15
1,5	13
1,6	11
1,7	10
1,8	9
1,9	8
2,0	7

$$I_p = f_p \times F_{td} \times n \times v \quad (2.19)$$

dimana :

I_p : Tekanan injeksi (N/cm^2)

f_p : Flow path (cm)

F_{td} : Faktor ketebalan produk (N/cm^3)

n : Jumlah cavity

v : Faktor keamanan $(1,25)$

Tekanan injeksi pada proses pencetakan produk yang mempunyai bentuk kompleks dan terbuat dari plastik dengan viskositas tinggi harus dikalikan dengan faktor viskositas terlebih dahulu. Adapun faktor viskositas ini dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Faktor viskositas dari beberapa macam plastik
(Mannesmann, 1982)

No	Material	Faktor viskositas
1	PE, PS, PP	1
2	PA	1,2 - 1,4
3	CA	1,3 - 1,5
4	ABS	1,3 - 1,4
5	PMMA	1,5 - 1,7
6	PC	1,7 - 2

2.5. Gaya Pencekaman

Tekanan injeksi pada permukaan cavity akan menghasilkan gaya injeksi (F_p) yang besarnya :

$$F_p = I_p \times A \times n \quad (2.20)$$

dimana :

F_p : Gaya injeksi (N)

I_p : Tekanan injeksi (N/m²)

A : Luas proyeksi produk (m²)

n : Jumlah cavity

Gaya injeksi diatas harus dapat ditahan oleh gaya pencekaman dari mesin, dan untuk itu gaya pencekaman mesin minimal 10% lebih besar dari gaya injeksi yang terjadi. Cetakan akan membuka pada saat terjadi penginjeksian jika gaya pencekaman dari mesin lebih kecil dari pada gaya injeksi yang terjadi. Hal ini akan menyebabkan cairan plastik yang diinjeksikan mengalir keluar dari rongga cavity, dan terjadi *flash*. Perumusan gaya pencekaman yang oleh cetakan dinyatakan oleh persamaan 2.21.

$$F_c = F_p \cdot (1 + 10\%) \quad (2.21)$$

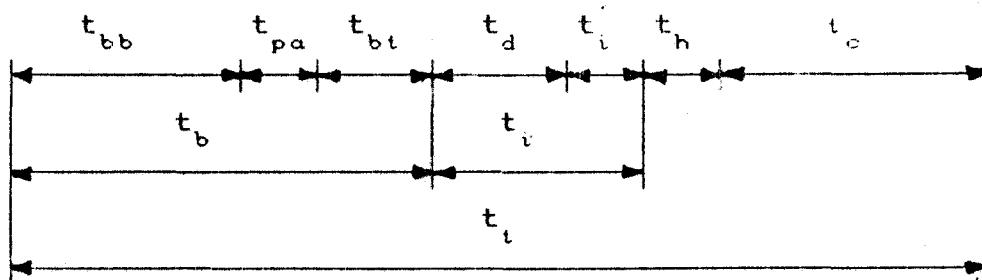
dimana :

F_c : Gaya pencekaman (N)

2.6. Cycle Time

Cycle time adalah total waktu yang dibutuhkan oleh cetakan plastik untuk mencetak produk dari bahan baku berupa biji - biji plastik menjadi produk jadi, untuk satu langkah injeksi.

Cycle time terdiri dari waktu gerak cetakan menutup dan membuka, *pause time*, waktu injeksi, *holding time*, dan waktu pendinginan. Ilustrasi dari *cycle time* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Cycle time

$$t_i = t_b + t_i + t_h + t_c \quad (2.22)$$

dimana :

t_i : *Cycle time*

t_b : Waktu gerak cetakan

t_{bb} : Waktu gerak cetakan membuka

t_{pa} : *Pause time*

t_{bt} : Waktu gerak cetakan menutup

t_i : Waktu injeksi

t_d : *Delay time*

t_i : Waktu injeksi sesungguhnya

t_h : Holding time

t_c : Waktu pendinginan

Waktu gerak cetakan (t_b) :

Adalah waktu yang diperlukan untuk membuka cetakan, mengeluarkan produk dari dalam cetakan, dan menutup kembali cetakan.

$$t_b = t_{bb} + t_{pa} + t_{bt} \quad (2.23)$$

Waktu gerak cetakan membuka (t_{bb}) :

Adalah waktu yang diperlukan cetakan untuk bergerak membuka dan mengeluarkan produk serta runner-nya dari dalam cetakan.

Kecepatan gerak cetakan membuka umumnya lebih lambat dari pada kecepatan gerak cetakan menutup. Hal ini dilakukan untuk menjaga agar produk tidak cacat waktu dikeluarkan dari cetakan.

$$t_{bb} = \frac{L}{v_{bb}} \quad (2.24)$$

dimana :

L : Jarak bukaan cetakan (mm)

v_{bb} : Kecepatan gerak cetakan membuka (mm/sec)

Waktu gerak cetakan menutup (t_{bt}) :

Adalah waktu yang diperlukan oleh cetakan untuk bergerak menutup.

$$t_{bt} = \frac{L}{v_{bt}} \quad (2.25)$$

dimana :

L : Jarak bukaan cetakan (mm)

v_{bt} : Kecepatan gerak cetakan menutup (mm/sec)

Pause Time (t_{pa}) :

Waktu cetakan berhenti bergerak sesaat sebelum cetakan menutup kembali.

Waktu injeksi (t_i) :

Adalah waktu yang diperlukan oleh cetakan mulai dari posisi cetakan menutup sampai cairan plastik mengisi penuh rongga cavity .

Setelah cetakan menutup nozel tidak langsung menginjeksikan cairan plastik, melainkan berhenti selama kurang lebih 3 detik sampai cetakan benar-benar siap dan proses penginjeksian dilakukan.

$$t_i = t_i' + t_d \quad (2.26)$$

Waktu injeksi sesungguhnya (t_i') :

Adalah waktu yang diperlukan oleh cairan plastik untuk mengisi rongga cavity sampai penuh.

$$t_i' = \frac{V_s}{V_m} \times t_{mi} \quad (2.27)$$

dimana :

V_s : Volume material untuk 1 kali injeksi (cm^3)

V_m : Volume injeksi maksimum (cm^3)

t_{mi} : Waktu injeksi untuk volume langkah maksimum (s)

Delay time (t_d) :

Adalah waktu yang diperlukan oleh cetakan setelah menutup sampai kondisi cetakan benar - benar siap menerima cairan plastik dari nozel.

Holding time (t_h) :

Adalah waktu yang diperlukan agar cairan plastik didalam rongga cavity benar - benar mampat.

Setelah proses penginjeksian selesai, nozel tidak langsung bergerak mundur melainkan diam selama 1 - 2 detik untuk memampatkan cairan plastik didalam cavity yang mulai menyusut.

Waktu pendinginan (t_c) :

Adalah lama waktu untuk menurunkan temperatur dinding produk dari temperatur pemasukan plastik kedalam cavity sampai mencapai temperatur pengeluaran produk.

Temperatur dinding cavity (T_v) :

$$T_{v \text{ maks}} = \frac{b_p \cdot T_{op} + b_v \cdot T_{ov}}{b_p + b_v} \quad (2.28)$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot k \cdot cp} \quad (2.29)$$

dimana :

b_p : Heat penetrability produk. $(m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2}$

b_v : Heat penetrability dinding cavity. $(m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2}$

T_v : Temperatur dinding cavity $(^{\circ}C)$

T_{op} : Temperatur cairan plastik sebelum kontak $(^{\circ}C)$

T_{ov} : Temperatur dinding cavity sebelum kontak $(^{\circ}C)$

Pada umumnya range temperatur dinding cavity berkisar antara $\pm 10^{\circ}C$. Jadi didapat temperatur tengah dinding cavity (T_v):

$$T_v = T_{v \text{ maks.}} - 10 \quad (2.30)$$

Perhitungan waktu pendinginan (t_c) :

asumsi:

1. Tepat setelah injeksi, temperatur cairan didalam cavity

dianggap konstan , sehingga T_m bukan fungsi dari jarak perambatan panas.

2. Temperatur dinding cavity dianggap konstan , sehingga T_v bukan merupakan fungsi dari waktu pendinginan t_c .

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot \lambda_p} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_m - T_v}{T_e - T_v} \right] \quad (2.31)$$

dimana :

s : Tebal dinding produk (mm)

T_m : Temperatur leleh (°C)

T_e : Temperatur keluaran produk (°C)

λ_p : Difusivitas panas produk (m^2/s)

2.7. Analisa Pendinginan

Kalor yang dilepaskan oleh material plastik didalam rongga cavity, dipindahkan kedinding cavity. Pemindahan kalor ini berlangsung secara rutin selama cetakan beroperasi, sehingga kalor yang diterima dinding cavity makin lama semakin banyak, dan akan menyebabkan kenaikan suhu pada dinding cavity. Setiap kenaikan suhu pada dinding cavity akan menghambat terjadinya pemindahan kalor, dan jika kenaikan suhunya mencapai suhu dari temperatur proses, maka pemindahan kalor tidak dapat berlangsung. Oleh karena itu, material plastik tetap dalam keadaan cair , sehingga

dibutuhkan pembuangan kalor secara buatan.

Pembuangan kalor dari dinding cavity dapat dilakukan dengan membuat saluran air didekat dinding cavity. Kalor yang diterima dinding cavity akan merambat kedinding saluran, kemudian dari dinding saluran ini kalor akan dihanyutkan oleh air.

2.7.1. Kebutuhan Air Pendingin

Penghanyutan kalor yang efektif hanya dapat dicapai apabila aliran air didalam saluran merupakan aliran turbulen. Lintasan air pada aliran turbulen akan bergulung-gulung, dimana suatu titik air yang sebelumnya berada ditengah saluran akan berpindah ke tepi saluran dan menyapu dinding saluran dengan cepat serta menghanyutkan kalor.

Aliran turbulen akan terjadi jika bilangan Reynold dari aliran air adalah :

$$Re > 2300 \quad (2.32)$$

$$Re_{sp} = \frac{V_{sp} \cdot d_{sp}}{\nu} \quad (2.33)$$

dimana :

Re : Bilangan Reynold

V_{sp} : Kecepatan aliran air (m/s)

d_{sp} : Diameter saluran (m)

ν : Viskositas air pendingin (m^2/s)

Kecepatan alir air pendingin (V_{sp}) :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{pompa} &= \dot{Q}_{sp} \\ &= V_{sp} \cdot A_{sp} \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$V_{sp} = \frac{\dot{Q}_{pompa}}{A_{sp}} \quad (2.35)$$

dimana :

\dot{Q}_{pompa} : Kapasitas alir pompa (l/min)

A_{sp} : Luas penampang saluran pendingin (m^2)

Jumlah air yang melintasi saluran pendingin (Q_{sp}) :

Jumlah air yang harus dialirkan untuk membuang kalor secara efektif adalah :

$$\dot{Q}_{sp} = 1/4 \times \pi \times d_{sp}^2 \times V_{sp} \quad (2.36)$$

dimana :

Q_{sp} : Jumlah air yang melintasi saluran pendingin (m^3/jam)

2.7.2. Analisa Kapasitas Pendinginan

Kalor yang diterima oleh air dari dinding cavity akan menaikkan temperatur air. Kenaikan temperatur air ini tidak boleh terlalu tinggi, sebab akan mengakibatkan perbedaan temperatur yang tinggi antara dinding cavity yang letaknya dekat masukan air pendingin dengan dinding cavity yang

letaknya dekat keluaran air pendingin. Selisih temperatur yang cukup tinggi pada dinding cavity akan menyebabkan tegangan dalam pada produk, sehingga produk akan rapuh.

Proses penghanyutan kalor oleh aliran air hanya berlangsung selama pemasukan cairan plastik kedalam cetakan dan selama waktu pendinginan. Oleh karena itu kenaikan suhu air dihitung pada saat tahap pendinginan.

$$Q_p = Q_{sp} \times \rho_a \times (T_{a_{out}} - T_{a_{in}}) \times h \quad (2.37)$$

dimana :

Q_p : Kapasitas pendinginan (kJ/jam)

ρ_a : Berat jenis air (kg/m^3)

c_{p_a} : Panas Jenis air (kJ/kg $^\circ\text{C}$)

$T_{a_{in}}$: Suhu masuk air pendingin ($^\circ\text{C}$)

$T_{a_{out}}$: Suhu keluar air pendingin ($^\circ\text{C}$)

h : Perbandingan antara waktu injeksi (t_i) dan waktu pendinginan (t_c) dengan cycle time (t_t)

$$h = \frac{t_i + t_c}{t_t} \quad (2.38)$$

2.7.3.Jumlah Panas yang Harus Dibuang (Q)

Jumlah panas yang dilepas plastik dan sistem hot runner kedalam cetakan (Q_o)

Besar kalor yang diterima oleh cetakan akan dibuang

oleh aliran air pendingin didalam saluran pendingin dan dibuang oleh cetakan, dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.39.

$$Q_o = (n \times i \times G) + Q_h \quad (2.39)$$

dimana :

Q_o : Jumlah panas yang dilepas plastik dan sistem hot

runner (kJ/jam)

Q_h : Jumlah panas yang dilepas sistem hot runner (kJ/jam)

n : Jumlah shot per jam (1/jam)

G : Berat plastik setiap shot (kg)

T_m : Temperatur proses (°C)

T_e : Temperatur keluaran produk (°C)

cp_p : Panas jenis material produk (kJ/kg.°C)

i : Perbedaan enthalpi dari temperatur plastik yang memasuki cetakan dengan temperatur keluaran produk

$$i = cp_p \times (T_m - T_e) \quad (2.40)$$

Jumlah panas yang dilepas ke udara bebas (Q_1)

Pembuangan panas cetakan oleh pendinginan alami berlangsung secara konveksi dan radiasi. Panas yang hilang secara radiasi sangat kecil maka dapat diabaikan.

Berdasarkan persamaan Mihajev pada batas suhu :

$$0 < T_w < 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,1868 \times \left(0,25 + \frac{360}{T_w + 300} \right) \times A \times (T_w - T_o)^{4/3} \quad (2.41)$$

dimana :

Q_1 : Jumlah panas yang dilepas ke udara bebas (kJ/jam)

T_w : Temperatur tengah dinding cetakan (°C)

T_o : Temperatur udara bebas (°C)

A : Luas cetakan yang berhubungan dengan udara bebas (m²)

Jumlah panas yang diterima oleh saluran pendingin (Q_2)

$$Q_2 = Q_o - Q_1 \quad (2.42)$$

dimana :

Q_2 : Jumlah panas yang diterima saluran pendingin (kJ/jam)

2.7.4. Panjang Saluran Pendingin yang Diperlukan

1. Pembuangan Panas Melalui Bagian Female dan Saluran

Pendingin yang Diperlukan

a. Panas yang diterima bagian female (Q_{zf})

$$Q_{zf} = \alpha_z \times A_p \times \tau \times (T_{zm} - T_v) \quad (2.43)$$

dimana :

Q_{zf} : Panas yang diterima bagian female (kJ/jam)

A_p : Luas permukaan produk (m²)

α_z : Koefisien perpindahan panas antara plastik dan cetakan (kJ/jam)

T_v : Suhu rata-rata dinding cavity (°C)

T_{zm} : Suhu rata - rata dari plastik yang dimasukkan (°C)

τ : Perbandingan waktu injeksi (t_i), holding time (t_h), dan waktu pendinginan (t_c) dengan cycle time (t_t)

$$\tau = \frac{t_i + t_h + t_c}{t_t} \quad (2.44)$$

b. Hambatan perambatan panas female (Rv)

$$Rv = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{2,3 \cdot L}{(A-a) \cdot b - (B-b) \cdot a} \right) \log \left(\frac{A}{a} \right) \cdot \left(\frac{B}{b} \right) \quad (2.45)$$

Hambatan perambatan panas female total (Rv_{tot})

$$\frac{1}{Rv_{tot}} = \frac{1}{Rv_1} + \dots + \frac{1}{Rv_n} \quad (2.46)$$

dimana :

Rv : Hambatan perambatan panas female (jam. °C/kJ)

A : Panjang cavity (m)

a : Panjang saluran pendingin searah A (m)

B : Tinggi dinding cavity (m)

b : Diameter saluran pendingin diukur searah B (m)

L : Jarak rata-rata dinding cavity kesaluran pendingin (m)

λ : Faktor perambatan panas AISI 420 (kJ/m.jam. $^{\circ}$ C)

n : Jumlah saluran pendingin yang simetris pada female

c. Temperatur rata-rata dinding saluran pendingin (T_{sp})

$$T_{sp} = T_v - (Q_{zf} + Rv_{tot}) \quad (2.47)$$

dimana :

T_{sp} : Temperatur rata-rata dinding saluran pendingin ($^{\circ}$ C)

d. Panjang saluran pendingin yang diperlukan (l_f)

$$l_f = \frac{Q_{zf} \times d_{sp}}{14,78 \times Q_{sp} \times (1 + 0,015 T_{am}) \times (T_{sp} - T_{am})} \quad (2.48)$$

dimana :

l_f : Panjang saluran pendingin yang diperlukan (m)

T_{am} : Temperatur tengah air pendingin ($^{\circ}$ C)

2. Pembuangan Panas Melalui Bagian Male dan Panjang

Saluran yang Diperlukan

a. Panas yang diterima bagian male (Q_{zm})

$$Q_{zm} = Q_z - Q_{zf} \quad (2.49)$$

dimana:

$$Q_{zm} : \text{Panas yang diterima bagian male} \quad (\text{kJ/jam})$$

b. Hambatan perambatan panas (Rv)

Male

$$Rv_1 = \frac{2,3}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_1} \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (2.50)$$

Male insert

$$Rv_2 = \frac{2,3}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_2} \log \left(\frac{d_4}{d_3} \right) \quad (2.51)$$

Hambatan perambatan panas total pada male dan male insert

$$\frac{1}{Rv_{tot}} = \frac{1}{Rv_1} + \dots + \frac{1}{Rv_n} \quad (2.52)$$

dimana :

Rv_1 : Hambatan perambatan panas male $(\text{jam.}^{\circ}\text{C}/\text{kJ})$

Rv_2 : Hambatan perambatan panas male insert $(\text{jam.}^{\circ}\text{C}/\text{kJ})$

d_2 : Diameter luar male (m)

d_1 : Diameter dalam male (m)

L_1 : Panjang male (m)

d_4 : Diameter luar male insert (m)

d_3 : Diameter dalam male insert (m)

L_2 : Panjang male insert (m)

λ : Faktor perambatan panas AISI 420 (kJ/m.jam.°C)

c. Temperatur rata-rata dinding saluran (T_{sp})

$$T_{sp} = T_v - (Q_{zm} \cdot Rv_{tot}) \quad (2.53)$$

dimana :

T_{sp} : Temperatur rata-rata dinding saluran pendingin (°C)

d. Panjang saluran pendingin yang diperlukan (l_m)

$$l_m = \frac{Q_{zm} \cdot d}{14,78 \times Q_{sp} \times (1 + 0,015 \cdot T_{am}) \times (T_{sp} - T_{am})} \quad (2.54)$$

dimana :

T_{am} : Temperatur tengah air pendingin (°C)

l_m : Panjang saluran pendingin yang diperlukan (m)

2.8. Gaya Pelepasan Produk

Gaya pelepasan produk adalah gaya yang diperlukan oleh cetakan untuk melepaskan produk dari male.

Pelepasan produk dari male dilakukan ketika suhu produk dan male masih diatas suhu kamar. Oleh karena produk dan male mempunyai sifat muai, maka pada suhu pelepasan

produk lebar male dan produk masih lebih besar dari pada Lebar male dan produk pada suhu kamar.

Lebar male dan produk pada saat pelepasan produk dapat dilihat pada perumusan 2.55 dan 2.56.

$$d_m' = d_m \{ 1 + \alpha_m \cdot (T_v - T_k) \} \quad (2.55)$$

$$d_p' = d_p \{ 1 + \alpha_p \cdot (T_e - T_k) \} \quad (2.56)$$

dimana :

d_m' : Lebar male pada saat pelepasan (mm)

d_m : Lebar male pada suhu kamar (mm)

d_p' : Lebar bagian dalam produk pada saat pelepasan (mm)

d_p : Lebar bagian dalam produk pada suhu kamar (mm)

α_m : Koef. muai linier male ($1/{}^\circ\text{K}$)

α_p : Koef. muai linier polipropilen ($1/{}^\circ\text{K}$)

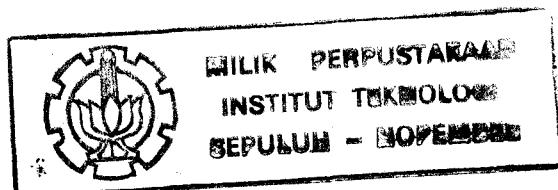
T_e : Temperatur produk saat pengeluaran produk (${}^\circ\text{C}$)

T_v : Temperatur male saat pengeluaran produk (${}^\circ\text{C}$)

T_k : Temperatur kamar (${}^\circ\text{C}$)

Faktor penyusutan yang terjadi pada saat pelepasan produk (S') dapat dilihat pada perumusan 2.57.

$$S' = \frac{d_p' - d_m'}{d_p'} \times 100 \% \quad (2.57)$$



Tegangan tarik pada produk saat produk mencengkeram male (τ_p) dapat dilihat pada perumusan 2.58.

$$\tau_p = \frac{s}{100} \times E_p \quad (2.58)$$

dimana :

E_p : Modulus elastisitas polipropilen (N/m^2)

τ_p : Tegangan tarik pada produk saat pelepasan (N/m^2)

Tegangan tarik pada produk saat produk mencengkeram male akan menimbulkan gaya pada penampang A - A produk yang besarnya seperti pada perumusan 2.59.

$$F_a = 2 \cdot s \cdot L_c \cdot \tau_p \quad (2.59)$$

dimana :

F_a : Gaya penampang A - A produk (N)

s : Tebal dinding produk (m)

L_c : Panjang male yang dicengkeram produk (m)

Gaya penampang (F_a) ini akan menimbulkan tekanan bidang (τ_b) pada male. Oleh karena luas penampang male secara proyekSIONAL adalah L_c dikalikan d_m , maka tekanan bidangnya seperti pada perumusan 2.60.

$$\tau_b = \frac{2 \cdot s \cdot L_c \cdot \tau_p}{L_c \cdot d_m} \quad (2.60)$$

$$\tau_b = \frac{2 \cdot s \cdot \tau_p}{d_m} \quad (2.61)$$

dimana :

τ_b : Tekanan bidang pada male (N/m^2)

Gaya pelepasan yang diperlukan agar produk mulai lepas dari male adalah (F_k) yang besarnya seperti pada perumusan 2.62.

$$F_k = \mu \times A_b \times \tau_b \quad (2.62)$$

$$= \mu \times \pi \times \frac{D + d}{2} \times L_c \times \tau_b$$

dimana :

F_k : Gaya pelepasan produk (N)

μ : Koefisien gesek antara plastik dengan male $(0,2)$

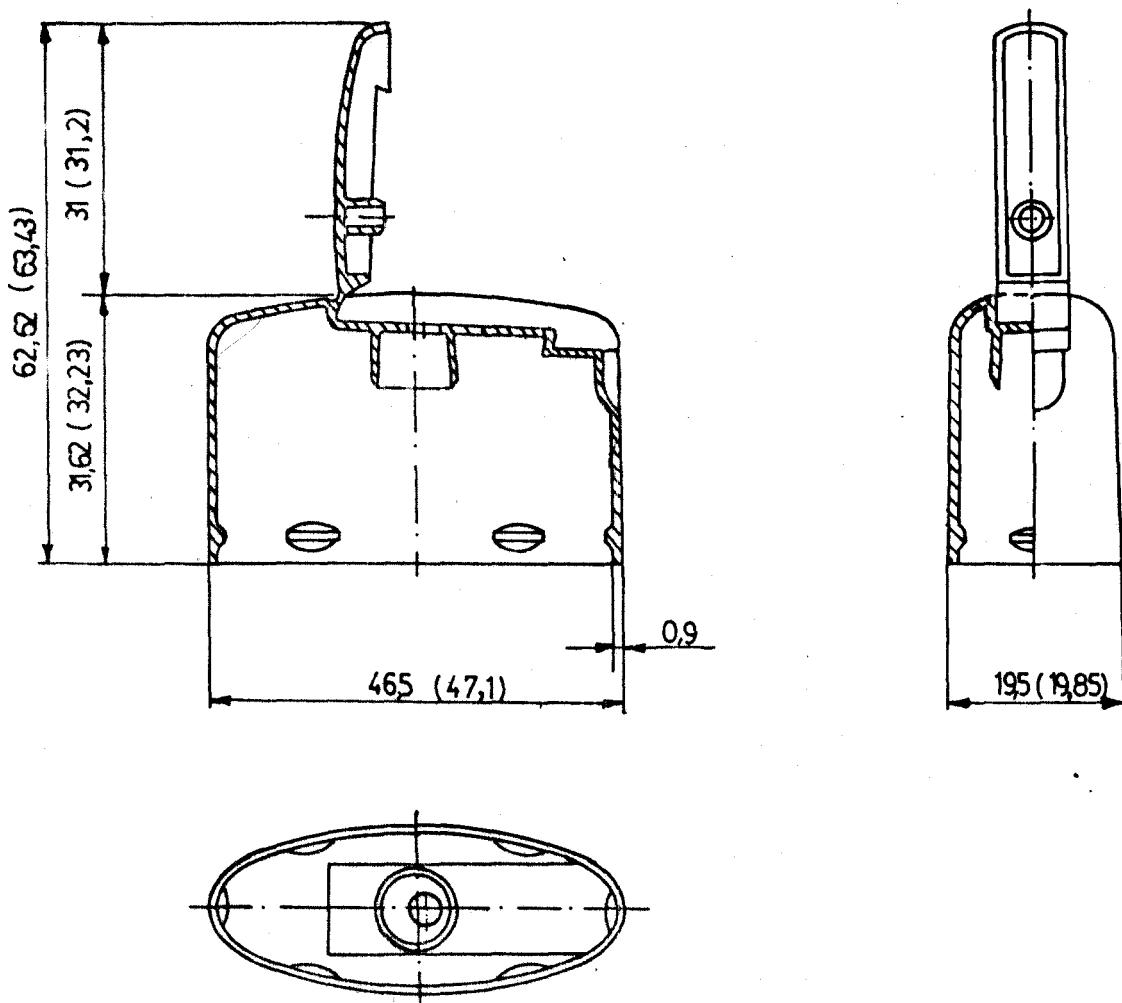
A_b : Luas permukaan produk yang mencengkeram male (m^2)

BAB III

ANALISA PROSES PENCETAKAN

3.1. Spesifikasi Produk

Produk yang akan dibuat adalah tutup botol *fliptop* untuk botol *shampoo* ukuran 100 ml. Gambar dari produk yang akan dicetak dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Skematik Produk

Bentuk, bahan baku, dan jumlah dari produk ditentukan oleh pemesan. Jumlah cavity ditentukan oleh pemesan dan disainer cetakan dengan mempertimbangkan hal - hal sebagai berikut :

- Disain cetakan
- Mekanisme pengeluaran produk
- Bentuk dan jumlah produk
- Mesin injeksi yang digunakan.

Adapun spesifikasi dari produk yang akan dibuat adalah sebagai berikut :

1. Bahan baku produk	:	polipropilen
- Berat jenis (ρ_p)	:	736,2 (kg / m^3)
- Panas jenis (c_{p_p})	:	3,093 ($\text{kJ} / \text{kg.}^\circ\text{C}$)
- Konduktivitas panas (k_p)	:	0,127 ($\text{W} / \text{m.}^\circ\text{C}$)
- Difusivitas panas (α_p)	:	$0,55 \cdot 10^{-7}$ (m^2/s)
- % Penyusutan (s_p)	:	1,2 - 2 (%)
- Temperatur leleh (T_l)	:	200 ($^\circ\text{C}$)
- Temperatur pembekuan (T_b)	:	107 ($^\circ\text{C}$)
2. Berat produk	:	4 (gr)
3. Jumlah produksi pertahun	:	6.000.000 produk
4. Waktu Produksi	:	2 Tahun
5. Jumlah hari kerja perbulan	:	20 Hari

3.2. Spesifikasi Mesin Injeksi

1. Model mesin	:	Arburg - Allrounder
----------------	---	---------------------

2. Unit pencekaman

- Gaya pencekaman : 700 (kN)
- Panjang bukaan cetakan : 40 - 250 (mm)
- Bukaan mesin total : 650 (mm)
- Tinggi cetakan : 200 - 400 (mm)
- Ukuran plat
(hor. x vert.) : 432 x 310 (mm)
- Ukuran maksimum cetakan
(hor. x vert.) : 310 x 305 (mm)
- Jarak antara tiang pengarah : 135 x 305 (mm)
- Gaya maksimum ejektor : 31 (kN)
- Langkah maksimum ejektor : 70 (mm)

3. Unit Injeksi

- Diameter ulir : 30 (mm)
- Panjang ulir (L/D) : 20
- Langkah maks. ulir efektif : 145 (mm)
- Volume sapuan maksimum : 103 (cm³)
- Volume injeksi maksimum : 82 (cm³)
- Tekanan nozel : 72 (kN)
- Tekanan injeksi maksimum : 2050 (bar)
- Waktu injeksi untuk volume langkah maksimum : 1,8 (s)
- Waktu injeksi untuk volume langkah maks. dg accumulator : 0,34 (s)
- Gaya injeksi maksimum : 145 (kN)
- Kecepatan ulir : 10 - 375 (rpm)
- Torsi ulir : 280 (Nm)

- Jangkauan nozel : 180 (mm)
- Silinder pemanas dan lapisan : 5250 + 310 (Watt)
pemanas nozel
- Jumlah daerah pemanasan : 3 + 1
- Kapasitas Hopper : 22 (liter)
- 4. Kapasitas maksimum shot material polipropilen , diameter ulir 33 mm. : 74 (gr)

3.3. Analisa Proses Pencetakan

3.3.1. Analisa Jumlah Cavity

Jumlah cavity dihitung berdasarkan kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi dan gaya pencekaman dari mesin . Hal ini bertujuan agar jumlah cavity sesuai dengan kemampuan dari mesin injeksi.

3.3.1.1. Jumlah Cavity Berdasarkan pada Kapasitas Maksimum Volume Satu langkah injeksi

Data analisa :

1. Berat produk (m_p) : $4 \cdot 10^{-3}$ (kg)
2. Berat jenis pp (ρ_p) : 736,2 (kg / m^3)
3. % Penyusutan (s) : 1,2 - 2 (%)
4. Kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi (V_s) : $82 \cdot 10^{-6}$ (m^3)

5. Volume satu produk (V_p) :

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (1 + s)$$

$$= \frac{4 \cdot 10^{-3}}{736,2} (1 + 0,02)$$

$$= 5,541 \cdot 10^{-6} (\text{m}^3)$$

Berdasarkan persamaan (2.1) didapat :

$$n_1 = 0,8 \cdot \frac{V_s}{V_p}$$

$$= 0,8 \cdot \frac{82 \cdot 10^{-6}}{5,541 \cdot 10^{-6}}$$

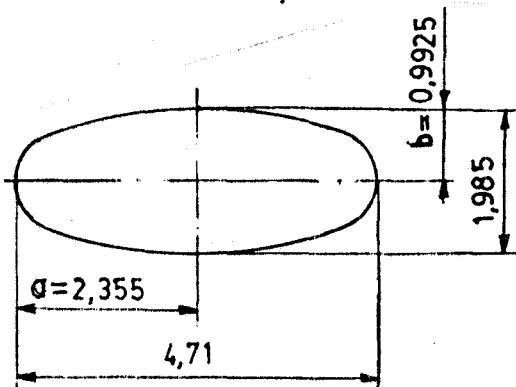
$$= 11,8 \text{ cavity}$$

$$= 11 \text{ cavity}$$

3.3.1.2. Jumlah Cavity Berdasarkan Gaya Pencekaman Mesin Injeksi

Data Analisa :

1. Luas proyeksi produk (A_p)



Gambar 3.2. Skematik luas proyeksi produk.

$$A_p = \pi \times a \times b$$

$$= \pi \times 2,355 \cdot 10^{-2} \times 0,9925 \cdot 10^{-2}$$

$$= 7,343 \cdot 10^{-4} (\text{m}^2)$$

2. Faktor keamanan (sf) : 1,2 - 1,5
 3. Gaya pencekaman maks. mesin injeksi (F_c) : 700 (kN)
 4. Tekanan injeksi maks. mesin injeksi (P_i) : 205 (MPa)

$$n_2 = \frac{F_c \times sf}{A_p \times P_i}$$

$$= \frac{700 \cdot 10^3 \times 1,2}{205 \cdot 10^6 \times 7,343 \cdot 10^{-4}}$$

$$= 5,58 \text{ cavity}$$

$$= 5 \text{ cavity}$$

Gaya pencekaman mesin injeksi hanya mampu menahang gaya injeksi yang timbul dari pengisian 5 cavity. Berdasarkan pertimbangan bahwa mekanisme pengeluaran produk yang digunakan adalah sistem slide sehingga jumlah cavity harus genap, dan dengan memperhatikan ukuran cetakan, serta jarak antara tiang pengarah pada mesin injeksi, dapat diambil kesimpulan bahwa jumlah cavity yang diijinkan adalah 4 cavity.

3.3.2. Analisa Hot Runner

Data Analisa :

1. Jenis material dari komponen sistem hot runner adalah AISI H 13. Sifat-sifat material :
- Berat jenis (ρ_{st}) : 7800 (kg/m³)
 - Koef. konduktivitas panas (k_{st}) : 24,6 (W/m.°C)
 - Panas spesifik (cp_{st}) : 460 (J/kg.°C)

2. Temperatur kamar (T_k) : 30 ($^{\circ}\text{C}$)
3. Temperatur proses (T_m) : 250 ($^{\circ}\text{C}$)
4. Temperatur film (T_f) : 140 ($^{\circ}\text{C}$)
5. Sifat-sifat udara pada tekanan atmosfir dan temperatur film (Lampiran 1) :
- Berat jenis (ρ_a) : 0,8459 (kg/m^3)
 - Viskositas kinematis (ν_a) : $27,9646 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)
 - Koef.konduktivitas panas (k_a) : $34,71 \cdot 10^{-3}$ ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$)
 - Difusivitas panas (α_a) : $40,614 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)
 - Bilangan Prandtl (Pr_a) : 0,68548
 - Koefisien ekspansi (β_a) = $1/T_f$: $2,42 \cdot 10^{-9}$ ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)
6. Untuk stainless steel dipoles pada $T_s = 523$ ($^{\circ}\text{K}$) dan $T_{\text{sur}} = 303$ ($^{\circ}\text{K}$) :
- Emisivitas (ϵ) : 0,1823
 - Konstanta stefan Boltzman (σ) : $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
7. Gaya gravitasi bumi (g) : 9,81 (m/s^2)
8. Panjang plat (L) : 0,416 (m)
9. Waktu pemanasan awal (t_{pa}) : 1800 (s)
10. Ukuran plat-plat cetakan $p \times l \times t$ (gbr. susunan cetakan) :
- Plat no 1 : $0,35 \times 0,3 \times 0,030$ (m)
 - Plat no 3 : $0,35 \times 0,25 \times 0,0215$ (m)
 - Plat no 4 : $0,35 \times 0,25 \times 0,074$ (m)
 - Plat no 5 : $0,35 \times 0,25 \times 0,027$ (m)
 - Plat no 6 : $0,35 \times 0,25 \times 0,036$ (m)

- Plat no 7 : $0,35 \times 0,25 \times 0,046$ (m)

- Plat insulasi 1 : $0,416 \times 0,246 \times 0,006$ (m)

- Plat insulasi 2 : $0,416 \times 0,266 \times 0,0045$ (m)

11. Koef. Konduktivitas panas plat no 4 AISI 420 (k_{st}) :
 23 (W / m . $^{\circ}$ K)

12. Koef. Konduktivitas panas plat no 1,3,5,6,dan 7 AISI H13
 (k_{st}) : $24,6$ (W/ m. $^{\circ}$ K)

13. Koef. Konduktivitas panas plat insulasi Magnesia 85 % :
 (k_i) : $0,061$ (W/ m. $^{\circ}$ K)

Jumlah panas yang dibutuhkan dalam jangka waktu tertentu untuk menaikan temperatur sistim hot runner dari temperature kamar ke temperatur proses.

1. Laju Pemanasan Awal

$$Q_{hr} = \frac{[(m_{st} \times cp_{st}) + (m_p \times cp_p)] \times (T_m - T_k)}{t}$$

Q_{hr} : Laju pemanasan awal hot runner (Watt)

m_{st} : massa hot runner (kg)

cp_{st} : panas spesifik AISI H 13 (J/ kg. $^{\circ}$ C)

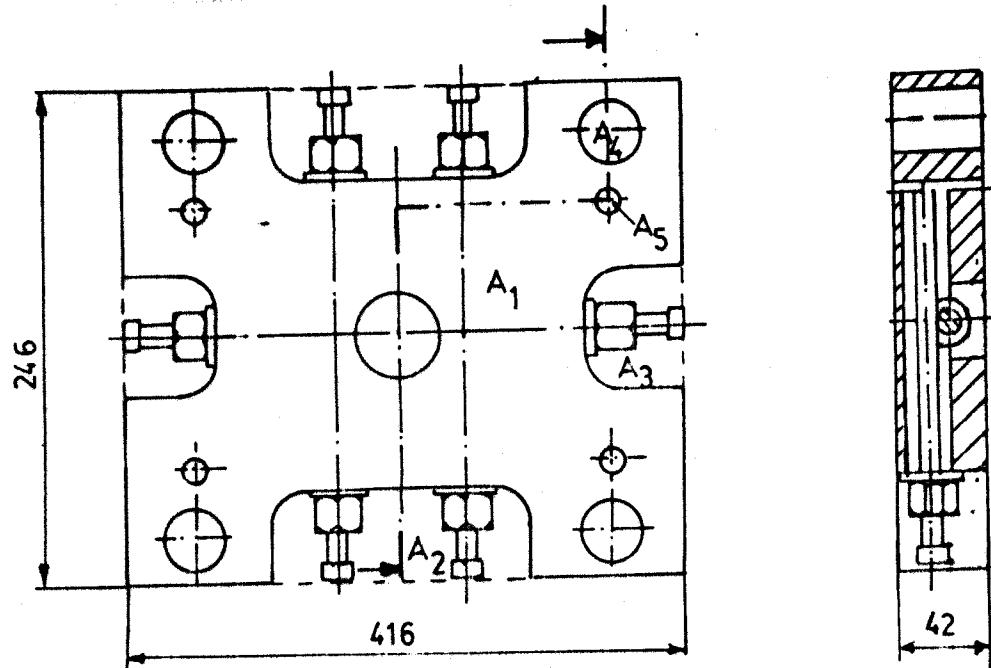
m_p : massa plastik dalam hot runner (kg)

cp_p : panas spesifik Polipropilen (J/ kg. $^{\circ}$ C)

T_m : Temperatur proses ($^{\circ}$ C)

T_k : Temperatur kamar ($^{\circ}\text{C}$)
 t : Lama waktu pemanasan manifold dari T_k ke T_m (s)

1. Manifold



Gambar 3.3. Skematik Manifold.

- Luas Permukaan manifold (A_{man}) :

$$- A_1 = 416 \times 246$$

$$= 102336 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$- A_2 = 2 \times \{(120 \times 35) + (90 \times 15) + (2 \times 1/4 \times \pi \times 15^2)\}$$

$$= 11806,86 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$- A_3 = 2 \times \{(80 \times .18) + (50 \times 15) + (2 \times 1/4 \times \pi \times 15^2)\}$$

$$= 5086,86 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$- A_4 = 4 \times (1/4 \times \pi \times 30^2)$$

$$= 2827,43 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$- A_5 = 4 \times (1/4 \times \pi \times 13^2)$$

$$= 530,93 \text{ (mm}^2 \text{)}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{man}} &= A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 \\ &= 102336 - 11806,86 - 5086,86 - 2827,43 - 530,93 \\ &= 82083,92 \text{ (mm}^2 \text{)} \end{aligned}$$

- Volume manifold (V_{man}) :

$$\begin{aligned} V_{\text{man}} &= A_{\text{man}} \times t_{\text{man}} \\ &= 82083,92 \times 42 \\ &= 3447524,644 \text{ (mm}^3 \text{)} \\ &= 3,447 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3 \text{)} \end{aligned}$$

- Volume saluran cairan plastik (V_{lp}) :

$$\begin{aligned} V_{lp} &= (2 \times 1/4 \times \pi \times 15^2 \times 316) + (1/4 \times \pi \times 15^2 \times 180) \\ &= 143492,24 \text{ (mm}^3 \text{)} \\ &= 1,435 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^3 \text{)} \end{aligned}$$

- Berat manifold (m_{man}) :

$$\begin{aligned} m_{\text{man}} &= (V_{\text{man}} - V_{lp}) \times \rho_{st} \\ &= (3,447 \cdot 10^{-3} - 1,435 \cdot 10^{-4}) \times 7800 \\ &= 25,767 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

- Volume silinder pemanas (V_{sp}) :

$$\begin{aligned} V_{sp} &= (2 \times 1/4 \times \pi \times 8^2 \times 316) + (1/4 \times \pi \times 8^2 \times 180) \\ &= 40815,57 \text{ (mm}^3 \text{)} \\ &= 4,08 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3 \text{)} \end{aligned}$$

- Massa plastik dalam manifold (m_{pman}) :

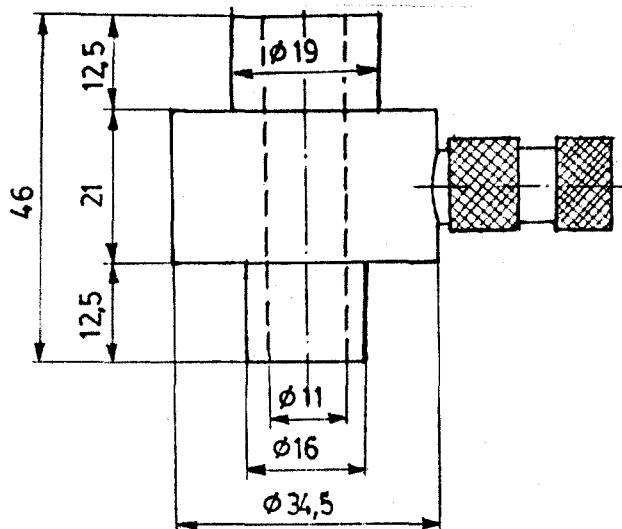
$$\begin{aligned} m_{pman} &= [V_{lp} - V_{sp}] \times \rho_p \\ &= (1,435 \cdot 10^{-4} - 4,08 \cdot 10^{-5}) \times 736,2 \\ &= 0,075 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

- Laju pemanasan awal manifold (Q_{man}) :

$$Q_{man} = \frac{\{(25,767 \times 460) + (0,075 \times 3093)\} \times (250 - 30)}{1800}$$

$$= 1477 \text{ (Watt)}$$

b. Penghubung Nozel



Gambar 3.4. Skematik Penghubung Nozel.

- Volume penghubung nozel (V_{pn}) :

$$V_{pn} = \{ 1/4 \times \pi \times ((3,45 \cdot 10^{-2})^2 \times 2,1 \cdot 10^{-2} + (1,9 \cdot 10^{-2})^2 \times 1,25 \cdot 10^{-2} + (1,6 \cdot 10^{-2})^2 \times 1,25 \cdot 10^{-2} - (1,1 \cdot 10^{-2})^2 \times 4,6 \cdot 10^{-2} \}$$

$$= 2,13 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

- Massa penghubung nozel (m_{pn}) :

$$m_{pn} = V_{pn} \times \rho_{st}$$

$$= 2,13 \cdot 10^{-5} \times 7800$$

$$= 0,166 \text{ (kg)}$$

- Volume plastik dalam penghubung nozel (V_{ppn}) :

$$V_{ppn} = V_{tp} - V_{sp}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1/4 \times \pi \times \{(1,1 \cdot 10^{-2})^2 \times 4,6 \cdot 10^{-2} \\
 &\quad - (0,8 \cdot 10^{-2})^2 \times 4,6 \cdot 10^{-2}\} \\
 &= 2,06 \cdot 10^{-6} (\text{m}^3)
 \end{aligned}$$

- Massa plastik dalam penghubung nozel (m_{ppn}) :

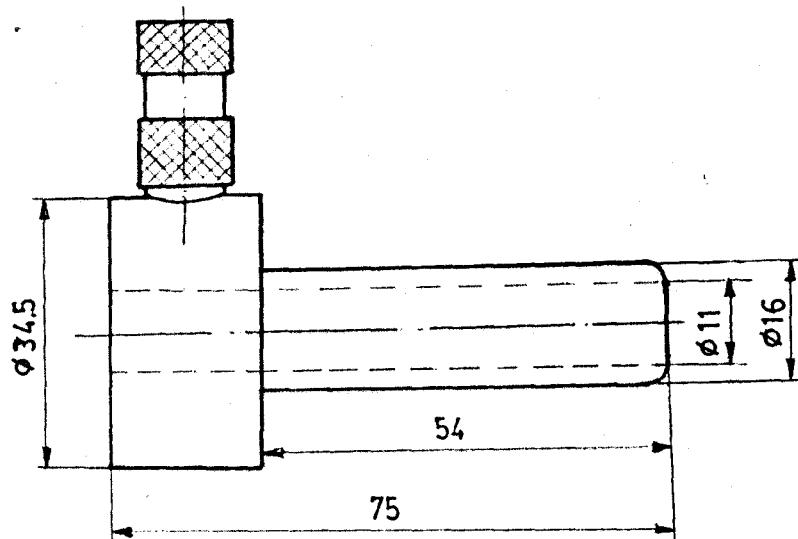
$$\begin{aligned}
 m_{ppn} &= V_{ppn} \times \rho_p \\
 &= 2,06 \cdot 10^{-6} \times 736,2 \\
 &= 1,52 \cdot 10^{-3} (\text{kg})
 \end{aligned}$$

- Laju pemanasan awal penghubung nozel (Q_{pn}) :

$$Q_{pn} = \frac{\{(0,166 \times 400) + (1,52 \cdot 10^{-3} \times 3093)\} \times (250 - 30)}{1800}$$

$$= 9,33 (\text{Watt})$$

c. Hot tips



Gambar 3.5. Skematik Hot Tips

- Volume hot tip (V_{ht}) :

$$V_{ht} = 1/4 \times \pi \times \{ (3,45 \cdot 10^{-2})^2 \times 2,1 \cdot 10^{-2} + (1,6 \cdot 10^{-2})^2 \times 54 \}$$

$$\times 5,4 \cdot 10^{-2} = (1,1 \cdot 10^{-2})^2 \times 7,5 \cdot 10^{-2}$$

$$= 2,336 \cdot 10^{-5} (\text{m}^3)$$

- Massa hot tip (m_{ht}) :

$$m_{ht} = V_{ht} \times \rho_{st}$$

$$= 2,336 \cdot 10^{-5} \times 7800$$

$$= 0,18 (\text{kg})$$

- Volume plastik dalam hot tip (V_{pht}) :

$$V_{pht} = V_{lp} - V_{sp}$$

$$= 1/4 \times \pi \times ((1,1 \cdot 10^{-2})^2 \times 7,5 \cdot 10^{-2} - (0,8 \cdot 10^{-2})^2$$

$$\times 7,5 \times 10^{-2})$$

$$= 3,35 \cdot 10^{-6} (\text{m}^3)$$

- Massa plastik dalam hot tip (m_{pht}) :

$$m_{pht} = V_{pht} \times \rho_p$$

$$= 3,35 \cdot 10^{-6} \times 736,2$$

$$= 2,47 \cdot 10^{-3} (\text{kg})$$

- Laju pemanasan awal hot tips (Q_{ht}) :

$$Q_{ht} = \frac{(0,18 \times 460) + (2,47 \cdot 10^{-3} \times 3093) \times (250 - 30)}{1800}$$

$$= 11 (\text{Watt})$$

2. Laju panas yang hilang

a. Manifold

- Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dan radiasi (q_{cr}) :

Konveksi yang terjadi adalah konveksi bebas, jadi

disekitar cetakan diasumsikan kecepatan udara sama dengan nol. Koefisien konveksi dapat dicari dengan menghitung terlebih dahulu bilangan Rayleigh dan bilangan Nusselt.

- Bilangan Rayleigh (Ra_L) :

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_f - T_\infty) \cdot L^3}{\nu_a \cdot \alpha_a}$$

$$= \frac{9,81 \times 2,42 \cdot 10 \times (523 - 303) \times (0,416)^3}{27,9646 \cdot 10^{-6} \times 40,614 \cdot 10^{-6}}$$

$$= 330898135,9$$

Aliran udara yang terjadi disekitar cetakan adalah aliran laminar, karena harga Ra_L diatas lebih besar dari 1×10^9 .

- Bilangan Nusselt (\overline{Nu}_L) untuk aliran panas yang laminar :

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\{1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\}^{4/9}}$$

$$= 0,68 + \frac{0,67 \times (0,33 \cdot 10^9)}{\{1 + (0,492 / 0,68548)^{9/16}\}^{4/9}}$$

$$= 69,76$$

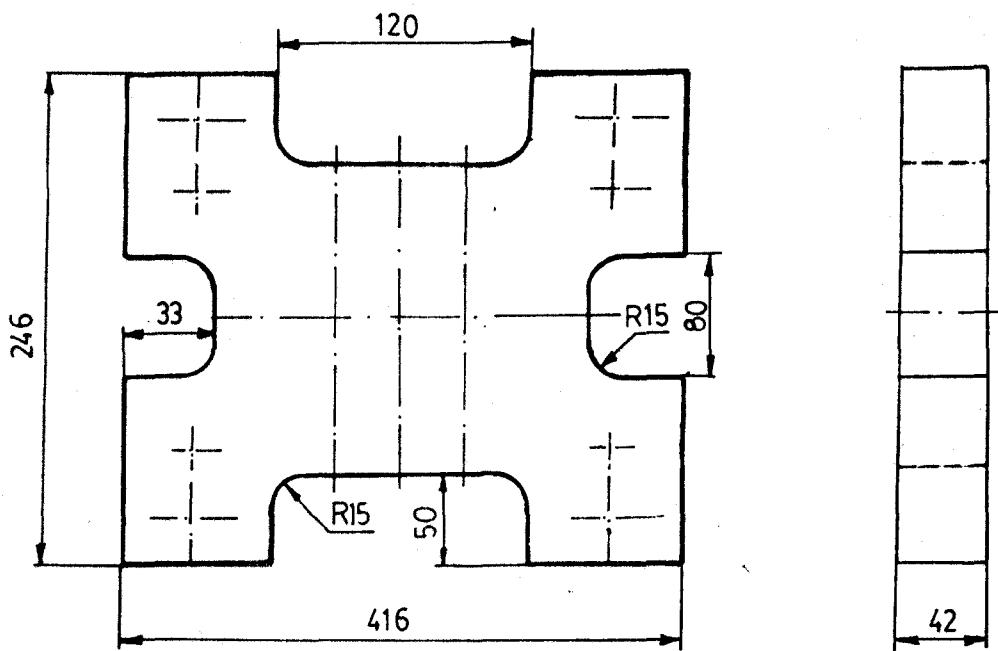
- Koefisien perpindahan panas konveksi (h) :

$$h = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k_a}{L}$$

$$= \frac{69,76 \times 34,71 \cdot 10^{-3}}{0,416}$$

$$= 5,25 (\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- Luas permukaan manifold yang berhubungan dengan udara
 (A) :



Gambar 3.8. Skematik permukaan manifold yang berhubungan dengan udara.

$$\begin{aligned}
 A &= 2 \times [(246-120)+(416-80)+2 \times \{35+45+18+25+(\pi \times 30)\}] \times 42 \\
 &= 75305,63 \text{ (mm}^2\text{)} \\
 &= 0,075 \text{ (m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

- Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi (q_c):

Asumsi :

- Incompressible flow.
- Kecepatan udara mendekati nol.

$$q_c = h \cdot A \cdot (T_e - T_\infty)$$

$$\begin{aligned} &= 5,25 \times 0,075 \times (523 - 303) \\ &= 87 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

- Laju perpindahan panas yang hilang karena radiasi (q_r):

$$\begin{aligned} q_r &= \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{sur}^4) \\ &= 0,1823 \times 0,075 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times (523^4 - 303^4) \\ &= 51 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

- Laju perpindahan panas yang hilang karena konveksi dan radiasi (q_{cr}):

$$\begin{aligned} q_{cr} &= q_c + q_r \\ &= 87 + 51 \\ &= 138 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

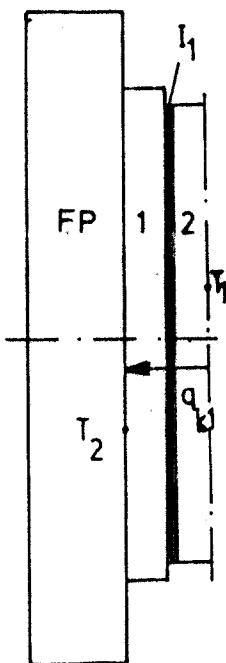
Berdasarkan hasil analisa didapat laju kehilangan panas yang hilang karena perpindahan panas konveksi dan radiasi pada bagian *manifold* yang berhubungan dengan udara bebas adalah 138 watt.

- Laju perpindahan panas yang hilang karena konduksi (q_k):

Asumsi :

- Konduksi satu dimensi
- Sifat-sifat konstan.

- Bagian samping kiri manifold :



Gambar 3.7. Skematik permukaan manifold samping kiri.

Tahanan panas konduksi total samping kiri ($R_{t,1}$)

Bagian samping kiri terdiri dari sebagian tebal manifold, plat insulasi dan top plate, jadi tahanan panas konduksi totalnya adalah :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R_{t,1}} &= \frac{1}{\frac{L_2}{k_2 \times A_2} + \frac{L_i}{k_i \times A_2} + \frac{L_1}{k_1 \times A_1}} \\
 &= \frac{1}{\frac{0,021}{24,6 \times 0,102} + \frac{0,006}{0,061 \times 0,102} + \frac{0,030}{24,6 \times 0,105}} \\
 &= 1,01 (\text{W} / ^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

Laju perpindahan panas, yang hilang karena konduksi pada permukaan bagian samping kiri *manifold*, adalah :

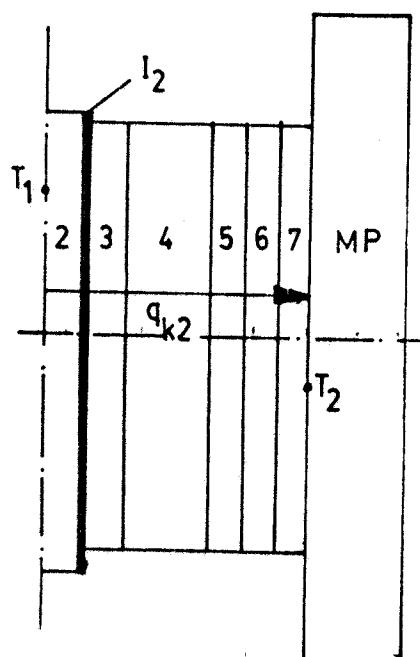
$$q_{k1} = \frac{1}{R_{t,1}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$= 1,01 \times (250 - 80)$$

$$= 176 \text{ (Watt)}$$

- Bagian samping kanan manifold :

$$A_3 = A_4 = A_5 = A_6 = A_7 = 0,25 \times 0,35 = 0,0875 \text{ (m}^2\text{)}$$



Gambar 3.8. Skematik permukaan manifold bagian samping kanan

Tahanan panas konduksi total bagian samping kanan ($R_{t,z}$)

Bagian samping kanan terdiri dari sebagian tebal manifold, plat insulasi, clamp female plate, female plate, male plate, stripper plate, bottom plate. Tahanan konduksi panas totalnya adalah :

$$\frac{1}{R_{t,z}} = \frac{1}{\frac{L_2}{k_2 \times A_2} + \frac{L_i}{k_i \times A_2} + \frac{L_3 + L_5 + L_6 + L_7}{k_{3,5,6,7} \times A_{3,5,6,7}} + \frac{L_4}{k_4 \times A_4}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\left[\frac{0,021}{24,6 \times 0,102} + \frac{0,0045}{0,061 \times 0,102} + \frac{0,0215 + 0,027 + 0,036 + 0,046}{2,46 \times 0,0875} \right.} \\ &\quad \left. + \frac{0,074}{23 \times 0,0875} \right]} \\ &= 1,2 \quad (\text{W/}^{\circ}\text{C}) \end{aligned}$$

Laju perpindahan panas yang hilang karena konduksi pada permukaan bagian samping kanan manifold, adalah :

$$q_{kz} = \frac{1}{R_{t,z}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$= 1,2 \cdot (250 - 50)$$

$$= 240 \quad (\text{Watt})$$

- Laju perpindahan panas yang hilang karena konduksi :

$$\begin{aligned} q_k &= q_{k1} + q_{k2} \\ &= 176 + 240 \\ &= 416 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

- Rata - rata laju perpindahan panas yang hilang selama pemanasan awal :

$$\begin{aligned} q_l &= \frac{q_{cr} + q_k}{2} \\ &= \frac{138 + 416}{2} \\ &= 277 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

Penghubung nozel dan *hot tip* hanya akan mengalami kehilangan laju perpindahan panas akibat konduksi. Dengan demikian prosentase laju perpindahan panas yang hilang pada *manifold*, penghubung nozel, dan *hot tip* dapat diasumsikan sama, yaitu :

$$\begin{aligned} \% q_l &= 416 / 1477 \times 100 \% \\ &= 28 \% \end{aligned}$$

Laju perpindahan panas yang hilang pada penghubung nozel dan *hot tips* dapat dihitung dengan menggunakan prosentase laju perpindahan panas yang hilang pada *manifold*.

b. Penghubung nozel

$$\begin{aligned} q_l &= 28 \% \times Q_{pn} \\ &= 28 \% \times 9,33 \\ &= 2,61 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

c. Hot tips

$$\begin{aligned} q_l &= 28\% \times Q_{ht} \\ &= 28\% \times 11 \\ &= 3,08 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

3. Laju perpindahan panas total yang diperlukan selama pemanasan awal

Manifold

$$\begin{aligned} Q_{man} &= Q_{man} + q_l \\ &= 1477 + 277 \\ &= 1754 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

Penghubung nozel

$$\begin{aligned} Q_{pn} &= Q_{pn} + q_l \\ &= 9,33 + 2,61 \\ &= 11,64 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

Hot tips (4 buah)

$$\begin{aligned} Q_{ht} &= 4 \times (Q_{ht} + q_l) \\ &= 4 \times (11 + 3,08) \\ &= 56,32 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

Sistim Hot Runner Keseluruhan

$$\begin{aligned} Q_H &= Q_{man} + Q_{pn} + Q_{ht} \\ &= 1754 + 11,64 + 56,32 \\ &= 1821,96 \text{ (Watt)} \\ &= 6559 \text{ (kJ/ Jam)} \end{aligned}$$

Dari hasil analisa dapat dilihat bahwa laju

perpindahan panas total yang diperlukan oleh sistem *hot runner* untuk mencapai temperatur proses 250°C adalah sebesar 6559 kJ/jam, dengan pemanasan awal selama setengah jam.

3.3.3. Analisa Tekanan Injeksi

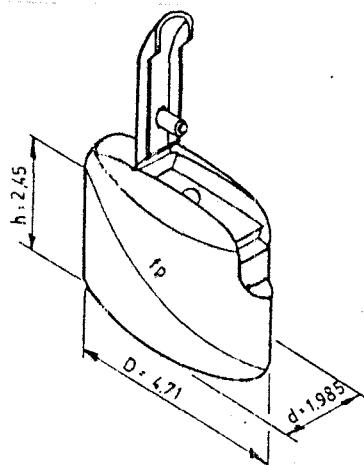
Analisa tekanan injeksi ini dilakukan dengan berdasarkan faktor ketebalan dinding produk.

Data analisa :

1. *Flow path* (f_p) :

Flow path adalah jarak terjauh yang harus ditempuh oleh cairan plastik yaitu jarak diagonal dari gate ke bagian ujung bawah produk.

$$\begin{aligned} f_p &= \sqrt{h^2 + \{ 1/2 \times 1/2 \times \pi \times (D + d) \}^2} \\ &= \sqrt{2,45^2 + \{ 1/4 \times \pi \times (4,71 + 1,985) \}^2} \\ &= 5,8 \quad (\text{cm}) \end{aligned}$$



Gambar 3.9. Skematik flow path produk.

2. Untuk $s = 0,9 \text{ mm}$, faktor ketebalan dinding : $35 (\text{N/cm}^3)$
3. Jumlah cavity (n) : 4
4. Faktor Keamanan (v) : 1,25

Tekanan injeksi (I_p) yang diperlukan untuk proses pencetakan adalah :

$$\begin{aligned} I_p &= F_p \times F_{td} \times n \times v \\ &= 5,8 \times 35 \times 4 \times 1,25 \\ &= 1015 \quad (\text{N/cm}^2) \\ &= 1,015 \cdot 10^7 \quad (\text{N/m}^2) \end{aligned}$$

Tekanan injeksi yang dibutuhkan untuk proses pencetakan masih lebih kecil dibandingkan dengan kemampuan tekanan injeksi dari mesin yaitu $2,050 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

3.3.4. Analisa Gaya Pencekaman

Data analisa :

1. Tekanan injeksi (I_p) : $1,015 \cdot 10^7 \quad (\text{N/m}^2)$
2. Jumlah cavity (n) : 4
3. Luas proyeksi produk (A) : $7,343 \cdot 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$

Gaya injeksi (F_p) yang terjadi adalah :

$$\begin{aligned} F_p &= I_p \times A \times n \\ &= 1,015 \cdot 10^7 \times 7,343 \cdot 10^{-4} \times 4 \\ &= 29,813 \quad (\text{KN}) \end{aligned}$$

Jadi gaya pencekaman (F_c) yang diperlukan oleh cetakan adalah :

$$\begin{aligned} F_c &= F_p \cdot (1 + 10\%) \\ &= 29,813 \cdot (1 + 10\%) \\ &= 32,7943 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisa dapat dilihat bahwa gaya pencekaman yang diperlukan masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan kemampuan gaya pencekaman mesin maksimum yang besarnya 700 KN.

3.3.5. Analisa Cycle Time

3.3.5.1. Analisa waktu gerak cetakan

Data Analisa :

1. Jarak bukaan cetakan (L) : 115 (mm)
2. Kecepatan gerak cetakan membuka (v_{bb}) : 50 (mm / s)
3. Kecepatan gerak cetakan menutup (v_{bt}) : 80 (mm / s)
4. Pause time (t_{pa}) : 0,4 (s)

Waktu gerak cetakan membuka (t_{bb}) :

$$\begin{aligned} t_{bb} &= \frac{L}{v_{bb}} \\ &= \frac{115}{50} \\ &= 2,3 \text{ (s)} \end{aligned}$$

Waktu gerak cetakan menutup (t_{bt}) :

$$t_{bt} = \frac{L}{v_{bt}}$$

$$= \frac{115}{80}$$

$$= 1,44 \text{ (s)}$$

Waktu yang diperlukan oleh cetakan untuk bergerak membuka dan menutup adalah :

$$t_b = t_{bb} + t_{bt} + t_{pa}$$

$$= 2,3 + 1,44 + 0,4$$

$$= 4,14 \text{ (s)}$$

3.3.5.2. Analisa waktu injeksi

Data analisa :

1. Volume injeksi maksimum (V_m) : 82 (cm^3)
2. Volume 1 kali injeksi (V_s) : 22,164 (cm^3)
3. Waktu injeksi untuk volume langkah maksimum (t_{mi}) : 1,8 (s)
4. Delay time (t_d) : 3 (s)

$$t_i = \frac{V_s}{V_m} \cdot t_{mi}$$

$$= \frac{22,164}{82} \cdot 1,8$$

$$= 0,49 \text{ (s)}$$

Waktu injeksi :

$$\begin{aligned} t_i &= t_i' + t_d \\ &= 0,49 + 3 \\ &= 3,49 \text{ (s)} \end{aligned}$$

Setelah penginjeksian, diberikan holding time (t_h) selama 1 detik untuk mengkompensasi penyusutan volume akibat proses pembekuan produk.

3.3.5.3. Analisa Waktu Pendinginan

Data analisa :

1. Temperatur dinding cavity (T_v) :

$$T_{v \text{ maks}} = \frac{b_p \cdot T_{op} + b_v \cdot T_{ov}}{b_p + b_v}$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot k \cdot cp}$$

- b_p : Heat penetrability produk. $(m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2}$
- b_v : Heat penetrability dinding cavity. $(m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2}$
- T_{op} : Temperatur cairan plastik sebelum kontak = 250 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ov} : Temperatur dinding cavity sebelum kontak = 50 ($^{\circ}\text{C}$)

$$\begin{aligned} - b_p &= \sqrt{736,2 \times 0,127 \times 3093} \\ &= 537,76 \quad (m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - b_v &= \sqrt{7800 \times 24,6 \times 460} \\ &= 9394,9 \quad (m^4 \cdot K^2 \cdot s)^{-1/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(9 \cdot 10^{-4})^2}{\pi^2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-7}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{250 - 50}{60 - 50} \right) \\
 &= 4,2 \text{ (s)}
 \end{aligned}$$

Jadi *cycle time* adalah :

$$\begin{aligned}
 c_t &= t_i + t_h + t_c + t_b \\
 &= 3,49 + 1 + 4,2 + 4,14 \\
 &= 12,83 \text{ (s)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisa *cycle time* diatas diketahui bahwa waktu yang diperlukan untuk satu kali proses (*cycle time*) adalah 12,83 detik.

3.3.6. Analisa Sistem Pendingin

3.3.6.1. Analisa Jumlah Air yang Melintasi Saluran Pendingin

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

Data analisa :

1. Kapasitas pompa air pendingin (\dot{Q}_{pompa}) : 20 (l/min)

2. Diameter saluran pendingin (d_{sp}) : 8 (mm)

3. Viskositas kinematis air pendingin (ν)

pada $T_p = 23,5^\circ\text{C}$ (lampiran 1) : $1 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)

Analisa:

1. Kecepatan alir air pendingin (V_{sp}) :

$$\dot{Q}_{pompa} = \dot{Q}_{sp}$$

$$= V_{sp} \cdot A_{sp}$$

$$\begin{aligned} V_{sp} &= \frac{Q_{pompa}}{A_{sp}} \\ &= \frac{20 \cdot 10^{-3} \times 4}{60 \times \pi \times (0,008)^2} \\ &= 6,63 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

Bilangan Reynold untuk aliran air disaluran pendingin :

$$\begin{aligned} Re_{sp} &= \frac{V_{sp} \cdot d_{sp}}{\nu} \\ &= \frac{6,63 \times 0,008}{1 \cdot 10^{-6}} \\ &= 53051 \end{aligned}$$

$Re_{sp} > 2300$ maka aliran dalam saluran air adalah aliran turbulen, sehingga penghanyutan kalor oleh air pendingin dapat berlangsung secara efektif.

2. Jumlah air yang melintasi saluran pendingin (Q_{sp}) :

$$\begin{aligned} Q_{sp} &= 1/4 \times \pi \times d^2 \times V_{sp} \\ &= 1/4 \times \pi \times (0,008)^2 \times 6,63 \\ &= 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{det}) \\ &= 1,2 \text{ (m}^3/\text{jam}) \end{aligned}$$

3.3.6.2. Analisa Kapasitas Pendinginan

Data Analisa :

1. Berat jenis air (ρ_a) : 1000 (kg/m^3)

2. Panas Jenis air (cp_a) : 4,19 (kJ/kg.°C)
3. Suhu masuk air pendingin ($T_{a_{in}}$) : 15 (°C)
4. Suhu keluar air pendingin ($T_{a_{out}}$) : 32 (°C)
5. Perbandingan antara waktu injeksi dan waktu pendinginan dengan cycle time (h) :

$$h = \frac{t_i + t_c}{t_t}$$

$$= \frac{3,49 + 4,2}{12,83}$$

$$= 0,599$$

Analisa :

$$Q_p = Q_{sp} \times cp_a \times (T_{a_{out}} - T_{a_{in}}) \times \rho_a \times h$$

$$= 1,2 \times 4,19 \times (32 - 15) \times 1000 \times 0,599$$

$$= 501200 \text{ (kJ/jam)}$$

3.3.6.3. Jumlah Panas yang Harus Dibuang

Data Analisa :

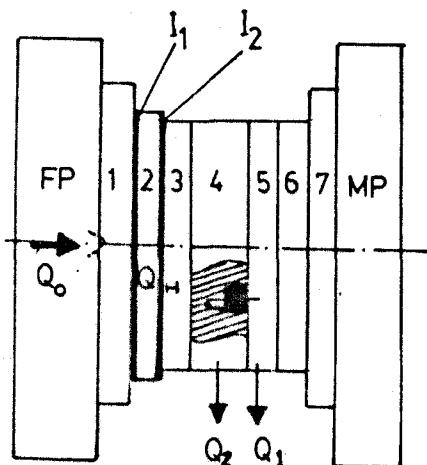
1. Jumlah shot per jam (n) : 298 (1/jam)
2. Berat plastik setiap shot (G) : 0,01632 (kg)
3. Temperatur tengah dinding cetakan (Tw) : 50 (°C)
4. Temperatur udara bebas (T_∞) : 30 (°C)
5. Luas cetakan yang berhubungan dengan udara bebas (A) :

$$A = 2 \times \{ (0,35 \times 0,287) + (0,25 \times 0,287) \}$$

$$= 0,3444 \text{ (m}^2 \text{)}$$

6. Perbedaan enthalpi dari temperatur plastik yang memasuki cetakan dengan temperatur keluaran produk (i):

$$\begin{aligned} i &= c p_p \times (T_m - T_E) \\ &= 3093 \times (250 - 60) \\ &= 587,67 \text{ (kJ/kg)} \end{aligned}$$



Gambar 3.10. Skematik panas yang terjadi pada cetakan.

Analisa :

1. Jumlah panas yang dilepas plastik dan sistem hot runner kedalam cetakan (Q_o)

$$\begin{aligned} Q_o &= (n \times i \times G) + Q_h \\ &= (298 \times 587,67 \times 0,01632) + 6559 \\ &= 9417 \text{ (kJ/jam)} \end{aligned}$$

2. Jumlah panas yang dilepas ke udara bebas (Q_1)

Pembuangan panas cetakan oleh pendinginan alami

berlangsung secara konveksi dan radiasi. Karena panas yang hilang secara radiasi sangat kecil maka dapat diabaikan.

Berdasarkan persamaan Mihajev pada batas suhu :

$$0 < T_v < 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= 4,1868 \times \left(0,25 + \frac{360}{T_v + 300} \right) \times A \times (T_w - T_o)^{4/3} \\ &= 4,1868 \times \left(0,25 + \frac{360}{T_v + 300} \right) \times 0,3444 (50 - 30)^{4/3} \\ &= 100 \text{ (kJ/jam)} \end{aligned}$$

3. Jumlah panas yang diterima oleh saluran pendingin (Q_2)

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_o - Q_1 \\ &= 9417 - 100 \\ &= 9317 \text{ (KJ/jam)} \end{aligned}$$

Oleh karena jumlah panas yang diterima oleh saluran pendingin (Q_2) masih lebih kecil dibandingkan kapasitas pendinginannya (Q_p) yaitu 501200 kJ/jam, maka sistem pendinginan sudah memadai.

3.3.6.4. Panjang Saluran Pendingin yang Diperlukan

1. Pembuangan panas melalui bagian female dan saluran pendingin yang diperlukan

Data Analisa :

1. Suhu rata-rata dinding cavity (T_v) : 50 ($^\circ\text{C}$)

2. Koefisien perpindahan panas antara

plastik dan cetakan (α_2) : 1549 (kJ/jam)

3. Suhu rata - rata dari plastik yang

dimasukkan (T_{zm}) : 250 ($^{\circ}\text{C}$)

4. Luas permukaan produk (A_p) :

$$A_p = \frac{V}{t_p}$$

$$= \frac{5,541 \cdot 10^{-6} \times 4}{9 \cdot 10^{-4}}$$

$$= 0,0246 (\text{m}^2)$$

5. Perbandingan waktu injeksi, *holding time*, dan waktu pendinginan dengan *cycle time* (τ) :

$$\tau = \frac{t_i + t_h + t_c}{t_t}$$

$$= \frac{3,49 + 1 + 4,2}{12,83}$$

$$= 0,677$$

1. Panas yang diterima bagian female (Q_{zf})

$$Q_{zf} = \alpha_2 \times A_p \times \tau \times (T_{zm} - T_v)$$

$$= 1549 \times 0,0246 \times 0,677 \times (250 - 50)$$

$$= 5159 (\text{kJ/jam})$$

b. Hambatan perambatan panas (R_v)

Analisa data :

1. Panjang cavity (A) : 0,0471 (m)
2. Panjang saluran pendingin searah A (a) : 0,076 (m)
3. Tinggi dinding cavity (B) : 0,074 (m)
4. Diameter saluran pendingin diukur searah
B (b) : 0,008 (m)
5. Jarak rata-rata dinding cavity kesaluran
pendingin (L) : 0,005 (m)
6. Faktor perambatan panas AISI 420 (λ) : 82,8 (kJ/m.jam. $^{\circ}$ C)
7. Jumlah saluran pendingin yang simetris
pada bagian female (n) : 8

$$\begin{aligned}
 R_v &= \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{2,3 \cdot L}{(A-a) \cdot b - (B-b) \cdot a} \right) \log \left\{ \left(\frac{A}{a} \right) \cdot \left(\frac{B}{b} \right) \right\} \\
 &= \frac{1}{82,8} \times \left(\frac{2,3 \times 0,005}{(0,0471-0,076) \times 0,008 - (0,074-0,008) \times 0,076} \right) \times \\
 &\quad \log \left\{ \left(\frac{0,0471}{0,076} \right) \times \left(\frac{0,008}{0,074} \right) \right\} \\
 &= 0,0310 \text{ (jam . }^{\circ}\text{C / kJ)}
 \end{aligned}$$

Hambatan perambatan panas total ($R_{v_{tot}}$)

$$\frac{1}{R_{v_{tot}}} = \frac{1}{R_{v_1}} + \dots + \frac{1}{R_{v_n}}$$

$$= 8 \times 1/0,0310 \\ = 257,46 \text{ (kJ/jam. } ^\circ\text{C)}$$

Jadi :

$$Rv_{tot} = 0,00388 \text{ (jam. } ^\circ\text{C / kJ)}$$

c. Temperatur rata-rata dinding saluran pendingin (T_{sp})

$$T_{sp} = T_v - (Q_{zf} \cdot Rv_{tot}) \\ = 50 - (5159 \times 0,00388) \\ = 29,9 \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

d. Panjang saluran pendingin yang diperlukan (l_f)

Data analisa:

Temperatur tengah air pendingin (T_{am}) : 23,5 $(^\circ\text{C})$

Analisa :

$$l_f = \frac{Q_{zf} \times d}{14,78 \times Q_{sp} \times (1 + 0,015 T_{am}) \times (T_{sp} - T_{am})} \\ = \frac{5159 \times 0,008}{14,78 \times 1,2 \times (1 + 0,015 \cdot 23,5) \times (29,9 - 23,5)} \\ = 0,269 \text{ (m)}$$

2. Pembuangan panas melalui bagian male dan panjang saluran yang diperlukan

a. Panas yang diterima bagian male (Q_{2m})

$$Q_{2m} = Q_2 - Q_{zf} \\ = 9317 - 5159 \\ = 4158 \text{ (kJ/jam)}$$

b. Hambatan perambatan panas (R_v)

Analisa data :

1. Diameter luar male (d_2) : 0,016 (m)
2. Diameter dalam male (d_1) : 0,008 (m)
3. Panjang male (L_1) : 0,0947 (m)
4. Diameter luar male insert (d_4) : 0,010 (m)
5. Diameter dalam male insert (d_3) : 0,005 (m)
6. Panjang male insert (L_2) : 0,0911 (m)
7. Faktor perambatan panas AISI 420 (λ) : 82,8 (kJ/m.jam. $^{\circ}$ C)

Male

$$R_{v_1} = \frac{2,3}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_1} \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

$$= \frac{2,3}{2 \times \pi \times 82,8 \times 0,0947} \log \left(\frac{0,016}{0,008} \right)$$

$$= 0,0141 \text{ (jam. } ^{\circ}\text{C/kJ)}$$

Male insert

$$R_{v_2} = \frac{2,3}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_2} \log \left(\frac{d_4}{d_3} \right)$$

$$= \frac{2,3}{2 \times \pi \times 82,8 \times 0,0911} \log \left(\frac{0,010}{0,005} \right)$$

$$= 0,0146 \text{ (jam. } ^{\circ}\text{C / KJ)}$$

Didalam male terdapat 2 saluran pendingin yang simetris, dan didalam male insert terdapat satu saluran pendingin. Cetakan ini mempunyai 4 cavity, jadi jumlah seluruh saluran pendingin yang simetris adalah 8 pada male dan 4 pada male insert.

Hambatan perambatan panas total pada male dan male insert

$$\frac{1}{Rv_{tot}} = \frac{1}{Rv_1} + \dots + \frac{1}{Rv_n}$$

$$= \{(8 \times 1/0,0141) + (4 \times 1/0,0146)\}$$

$$= 569,26 + 273,8$$

$$= 843,06 (\text{KJ/jam. } ^\circ\text{C})$$

Jadi :

$$Rv_{tot} = 0,00119 (\text{jam. } ^\circ\text{C / KJ})$$

c. Temperatur rata-rata dinding saluran (T_{sp})

$$\begin{aligned} T_{sp} &= T_v - (Q_{zm} \cdot Rv_{tot}) \\ &= 50 - (4158 \times 0,00119) \\ &= 42,1 (\text{ } ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

d. Panjang saluran pendingin yang diperlukan (l_m)

Data Analisa :

1. Temperatur tengah air pendingin (T_{am}): 23,5 ($^\circ\text{C}$)

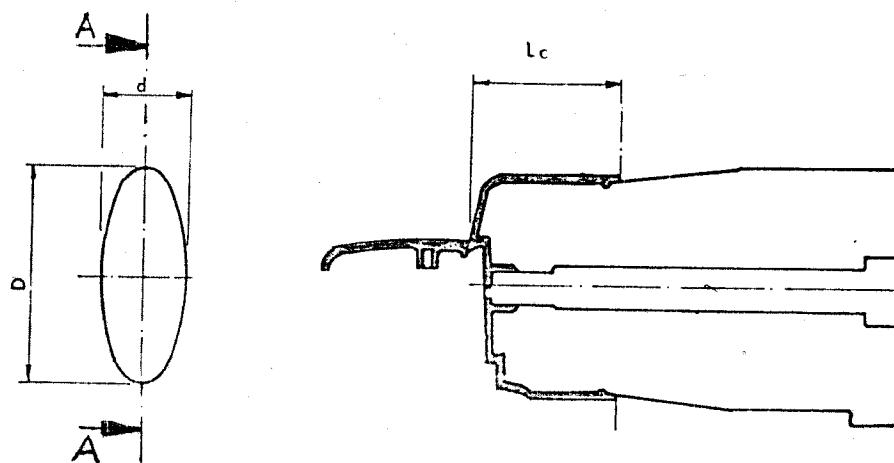
Analisa :

$$\begin{aligned} l_m &= \frac{Q_{zm} \cdot d}{14,78 \times Q_{sp} \times (1 + 0,015 \cdot T_{am}) \times (T_{sp} - T_{am})} \\ &= \frac{4158 \times 0,008}{14,78 \times 1,2 \times (1 + 0,015 \cdot 23,5) \times (42,1 - 23,5)} \\ &= 0,119 (\text{m}) \end{aligned}$$

3.3.7. Gaya Pelepasan Produk

Data analisa :

1. Koef. muai linier male (λ_m) : $11 \cdot 10^{-6}$ ($1/\text{^{\circ}K}$)
2. Koef. muai linier polipropilen (λ_p) : $1 \cdot 10^{-4}$ ($1/\text{^{\circ}K}$)
3. Temperatur produk saat pengeluaran produk (T_e) : 60 ($^{\circ}\text{C}$)
4. Temperatur male saat pengeluaran produk (T_v) : 50 ($^{\circ}\text{C}$)
5. Temperatur kamar (T_k) : 30 ($^{\circ}\text{C}$)
6. Modulus elastisitas polipropilen (E_p) : $1,5 \cdot 10^9$ (N/m^2)
7. Tegangan tarik (τ_t) : $33 \cdot 10^6$ (N/m^2)
8. Lebar bagian dalam produk (d_p) : 45,3 (mm)
9. Lebar male (d_m) : 45,3 (mm)



Gambar 3.11. Skematik produk pada male

Analisa :

Lebar male pada saat pengeluaran produk (d') :

$$\begin{aligned} d'_m &= d_m \{ 1 + \alpha_m \cdot (T_v - T_k) \} \\ &= 45,3 \{ 1 + 11 \cdot 10^{-6} (50 - 30) \} \\ &= 45,3099 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

Lebar produk pada saat pengeluaran produk (d'_p) :

$$\begin{aligned} d'_p &= d_p \{ 1 + \alpha_p \cdot (T_v - T_k) \} \\ &= 45,3 \{ 1 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot (60 - 30) \} \\ &= 45,4359 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

Penyusutan pada saat pelepasan produk (s') :

$$\begin{aligned} s' &= \frac{d'_p - d'_m}{d'_p} \times 100 \% \\ &= \frac{45,4359 - 45,3099}{45,4359} \times 100 \% \\ &= 0,277 \% \end{aligned}$$

Tegangan tarik pada produk (τ_p) :

$$\begin{aligned} \tau_p &= \frac{s'}{100} \times E \\ &= \frac{0,277}{100} \times 1,5 \cdot 10^9 \\ &= 4,16 \cdot 10^6 \text{ (N/m}^2 \text{)} \end{aligned}$$

Gaya penampang A - A (F_a) :

$$\begin{aligned} F_a &= 2 \cdot s \cdot L_c \cdot \tau_p \\ &= 2 \times 9 \cdot 10^{-4} \times 32,23 \cdot 10^{-3} \times 4,16 \cdot 10^6 \\ &= 241,9 \text{ (N)} \end{aligned}$$

Tekanan bidang pada penampang A-A male (τ_p) :

$$\begin{aligned} \tau_b &= \frac{2 \cdot s \cdot \tau_p}{d_m} \\ &= \frac{2 \times 9 \cdot 10^{-4} \times 4,16 \cdot 10^6}{45,3 \cdot 10^{-3}} \\ &= 165199 \text{ (N/m}^2 \text{)} \end{aligned}$$

Gaya pelepasan produk (F_k) :

$$\begin{aligned} F_k &= \mu \times A_b \times \tau_b \\ &= \mu \times \pi \times \frac{D + d}{2} \times L_c \times \tau_b \\ &= 0,2 \times \pi \times \frac{45,3 \cdot 10^{-3} + 18,05 \cdot 10^{-3}}{2} \times 32,23 \cdot 10^{-3} \times 165199 \\ &= 105,96 \text{ (N)} \end{aligned}$$

Jadi dengan gaya pelepasan produk (F_k) sebesar 105,96 (N) produk mulai lepas dari male.

BAB IV

KESIMPULAN

Hasil dari analisa proses pencetakan tutup botol plastik *fliptop* ditabelkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil analisa proses pencetakan

No	Bagian proses	Kebutuhan
1	Cavity (n)	4 buah
2	Laju perpindahan panas total yang diperlukan selama pemana-san awal sistem <i>hot runner</i> (Q_H) berasal dari :	1821,96 Watt
	a. <i>Manifold</i> (Q_{man})	1754 Watt
	b. Penghubung nozel (Q_{pn})	11,64 Watt
	c. <i>Hot Tip</i> (Q_{ht})	56,32 Watt
3	Tekanan Injeksi (I_p)	$1,015 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
4	Gaya Pencekaman (F_c)	32,7943 kN
5	<i>Cycle time process</i> (t_c) terdiri dari :	12,83 detik
	a. Waktu injeksi (t_i)	3,49 detik
	b. Waktu gerak cetakan (t_b)	4,14 detik
	c. <i>Holding time</i> (t_h)	1 detik
	d. Waktu pendinginan (t_c)	4,2 detik
6	Sistem Pendingin meliputi:	
	a. Jumlah air yang melintasi saluran pendingin (Q_{sp})	1,2 m^3/jam
	b. Kapasitas pendinginan (Q_p)	501200 kJ/jam
	c. Jumlah panas yang harus dibuang (Q_o)	9417 kJ/jam
	d. Panjang saluran pendingin yang diperlukan - Female (l_f)	0,269 m
	- Male (l_m)	0,119 m
7	Gaya pelepasan produk (F_k)	105,96 N

Berdasarkan hasil analisa proses pencetakan pada tabel 4.1, spesifikasi produk, spesifikasi mesin, dan disain dari cetakan injeksi , dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Jumlah cavity yang terdapat pada cetakan injeksi adalah 4 cavity, dan masih dibawah jumlah cavity maksimum yaitu 5 cavity. Jumlah ini yang didapat dari hasil perhitungan berdasarkan kapasitas maksimum volume satu langkah injeksi dan gaya pencekaman mesin injeksi yang digunakan. Jadi mesin injeksi dan cetakan injeksi yang digunakan sudah memadai untuk proses pencetakan produk.
2. Pemanasan awal sistem *hot runner* yang terdiri dari 1 *manifold*, 1 penghubung nozél, dan 4 *hot tip* , memerlukan waktu selama setengah jam dan laju perpindahan panas sebanyak 1821,96 watt.
3. Tekanan injeksi yang terjadi pada proses pencetakan produk hanya menimbulkan gaya injeksi sebesar 29,813 kN . Jadi cetakan hanya membutuhkan gaya pencekaman sebesar 32,7943 kN, masih jauh lebih kecil dibandingkan gaya pencekaman mesin yaitu 700 kN, sehingga cetakan tidak akan membuka pada saat proses penginjeksian plastik kedalam cavity.
4. Cycle time yang dibutuhkan adalah 12,83 detik.

Tugas Akhir - 81

5. Kapasitas pendinginan dari sistem pendinginan cetakan injeksi adalah 501200 kJ/jam , sehingga mampu membuang jumlah panas yang timbul sebesar 9417 kJ/jam . Jadi sistem pendinginan dari cetakan injeksi sudah cukup memadai untuk proses pencetakan produk yang baik.
6. Gaya pelepasan yang dibutuhkan untuk melepaskan produk dari male adalah sebesar $105,96 \text{ N}$.

LAMPIRAN A
SIFAT-SIFAT FISIK MATERIAL

Tabel

hal

A1. Sifat-sifat fisik udara pada tekanan atmosfir.	L1
A2. Sifat-sifat fisik dari material insulasi.	L2
A3. Sifat-sifat fisik dari air jenuh.	L3
A4. Emisivitas material.	L4

LAMPIRAN B
GAMBAR CETAKAN INJEKSI

Tabel A1. Sifat-sifat fisik udara pada tekanan atmosfir.**Table A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure^a**

<i>T</i> (K)	<i>ρ</i> (kg/m ³)	<i>c_p</i> (kJ/kg · K)	<i>μ · 10⁷</i> (N · s/m ²)	<i>v · 10⁶</i> (m ² /s)	<i>k · 10³</i> (W/m · K)	<i>α · 10⁴</i> (m ² /s)	<i>Pr</i>
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Ammonia (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869
400	0.5136	2.287	138	26.9	37.0	31.5	0.853
420	0.4888	2.322	145	29.7	40.4	35.6	0.833
440	0.4664	2.357	152.5	32.7	43.5	39.6	0.826

Tabel A2. Sifat-sifat fisik dari material insulasi.

Industrial Insulation

DESCRIPTION/COMPOSITION	MAX SERVICE TEMP (K)	TYPICAL DENSITY (kg/m ³)	TYPICAL THERMAL CONDUCTIVITY, k (W/m·K), AT VARIOUS TEMPERATURES (K)														
			200	215	230	240	255	270	285	300	310	365	420	530	645	750	
Blankets																	
Blanket, mineral fiber, metal reinforced	920	96-192										0.038	0.046	0.056	0.078		
	815	40-96										0.035	0.045	0.058	0.088		
Blanket, mineral fiber, glass; fine fiber, organic bonded	450	10										0.036	0.038	0.040	0.043		
		12										0.035	0.036	0.039	0.042		
		16										0.033	0.035	0.036	0.039		
		24										0.030	0.032	0.033	0.036		
		32										0.029	0.030	0.032	0.033		
		48										0.027	0.029	0.030	0.032		
Blanket, alumina-silica fiber	1,530	48												0.071	0.105	0.150	
		64												0.059	0.087	0.125	
		96												0.052	0.076	0.100	
		128												0.049	0.068	0.091	
Felt, semiringed; organic bonded	480	50-125										0.035	0.036	0.038	0.039	0.051	0.063
	730	50	0.021	0.025	0.026	0.027	0.029	0.030	0.032	0.033	0.035	0.051	0.079				
Felt, laminated; no binder	920	120												0.051	0.065	0.087	
Blocks, Boards, and Pipe Insulations																	
Asbestos paper, laminated and corrugated												0.078	0.082	0.098			
4-ply	420	190															
6-ply	420	255										0.071	0.074	0.085			
8-ply	420	300										0.068	0.071	0.082			
Magnesia, 85%	590	185										0.051	0.055	0.061			
Calcium silicate	920	190										0.055	0.059	0.063	0.075	0.089	0.104
Cellular glass	700	145										0.046	0.048	0.051	0.052	0.055	0.058
Diatomaceous silica	1,145	345										0.052	0.055	0.058	0.062	0.069	0.079
	1,310	385													0.092	0.098	0.104
Polystyrene, rigid															0.101	0.100	0.115
Extruded (R-12)	350	56	0.023	0.023	0.022	0.023	0.023	0.025	0.026	0.027	0.029						
Extruded (R-12)	350	35	0.023	0.023	0.023	0.025	0.025	0.026	0.027	0.029							
Molded beads	350	16	0.026	0.029	0.030	0.033	0.035	0.036	0.038	0.040							
Rubber, rigid foamed	340	70										0.029	0.030	0.032	0.033		

Tabel A3. Sifat-sifat fisik dari air jenuh.

Table A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water^a

TEMPERATURE, T °C	PRESSURE, P (bars) ^b	SPECIFIC VOLUME (m ³ /kg)		SPECIFIC HEAT OF VAPORIZATION, h _{fg} (kJ/kg)		SPECIFIC HEAT (kJ/kg · K)		VISCOSITY (N · s/m ²)		THERMAL CONDUCTIVITY (W/m · K)		PRANDTL NUMBER		SURFACE TENSION, σ · 10 ³ (N/m)	EXPANSION COEFFICIENT, β · 10 ⁶ (K ⁻¹)	TEMPERA- TURE, T (K)
		v _f · 10 ³	v _s	c _{p,f}	c _{p,s}	μ _f · 10 ⁶	μ _s · 10 ⁶	k _f · 10 ³	k _s · 10 ³	Pr _f	Pr _s	—	—	—	—	—
15	0.00611	1.000	206.3	2502		4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
	0.00697	1.000	181.7	2497		4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
	0.00990	1.000	130.4	2485		4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
	0.01387	1.000	99.4	2473		4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.3	285
	0.01917	1.001	69.7	2461		4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
	0.02617	1.002	51.94	2449		4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
	0.03531	1.003	39.13	2438		4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
	0.04712	1.005	27.90	2426		4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
	0.06221	1.007	22.93	2414		4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
	0.08132	1.009	17.82	2402		4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
	0.1053	1.011	13.98	2390		4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
	0.1351	1.013	11.06	2378		4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
	0.1719	1.016	8.82	2366		4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
	0.2167	1.018	7.09	2354		4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
	0.2713	1.021	5.74	2342		4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
	0.3372	1.024	4.683	2329		4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
	0.4163	1.027	3.846	2317		4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
	0.5100	1.030	3.180	2304		4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
	0.6209	1.034	2.645	2291		4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
	0.7514	1.038	2.212	2278		4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
	0.9040	1.041	1.861	2265		4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
	1.0133	1.044	1.679	2257		4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
	1.0815	1.045	1.574	2252		4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
	1.2869	1.049	1.337	2239		4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
	1.5233	1.053	1.142	2225		4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385
	1.794	1.058	0.980	2212		4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841	390
	2.455	1.067	0.731	2183		4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896	400
	3.302	1.077	0.553	2153		4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952	410
	4.370	1.088	0.425	2123		4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010	420
	5.699	1.099	0.331	2091		4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2		430
	7.333	1.110	0.261	2059		4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1		440
	9.319	1.123	0.208	2024		4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9		450
	11.71	1.137	0.167	1989		4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7		460
	14.55	1.152	0.136	1951		4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5		470
	17.90	1.167	0.111	1912		4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2		480

Tabel A4. Emisivitas material.

DESCRIPTION/COMPOSITION	EMISSIVITY, ϵ_s OR ϵ_b AT VARIOUS TEMPERATURES (K)									
	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1500	2000
Aluminum										
Highly polished, film	(h)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06				
Foil, bright	(h)	0.06	0.06	0.07						
Anodized	(h)			0.82	0.76					
Chromium										
Polished or plated	(n)	0.05	0.07	0.10	0.12	0.14				
Copper										
Highly polished	(h)			0.03	0.03	0.04	0.04	0.04		
Stably oxidized	(h)					0.50	0.58	0.80		
Gold										
Highly polished or film	(h)	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06		
Foil, bright	(h)	0.06	0.07	0.07						
Molybdenum										
Polished	(h)					0.06	0.08	0.10	0.12	0.15
Shot-blasted, rough	(h)					0.25	0.28	0.31	0.35	0.42
Stably oxidized	(h)					0.80	0.82			
Nickel										
Polished	(h)					0.09	0.11	0.14	0.17	
Stably oxidized	(h)					0.40	0.49	0.57		
Platinum										
Polished	(h)						0.10	0.13	0.15	0.18
Silver										
Polished	(h)			0.02	0.02	0.03	0.05	0.08		
Stainless steels										
Typical, polished	(n)		0.17	0.17	0.19	0.23	0.30			
Typical, cleaned	(n)		0.22	0.22	0.24	0.28	0.35			
Typical, lightly oxidized	(n)					0.33	0.40			
Typical, highly oxidized	(n)					0.67	0.70	0.76		
AISI 347, stably oxidized	(n)					0.87	0.88	0.89	0.90	
Tantalum										
Polished	(h)							0.11	0.17	0.23
Tungsten										
Polished	(h)						0.10	0.13	0.18	0.25
										0.29

