

Contoh Soal:

Rancangan Rotary Dryer untuk Pengeringan Pupuk ZA (Ammonium Sulphate)

Data Operasi:

- **Kapasitas umpan basah (F):** 10.000 kg/jam
- **Kadar air awal (Xf):** 20% berat (basis basah)
- **Kadar air akhir (Xp):** 2% berat (basis basah)
- **Udara pengering:**
 - Suhu masuk (T1): 30°C, kelembaban (H1): 0,015 kg H₂O/kg udara kering
 - Suhu keluar (T2): 85°C
 - Dipanaskan oleh heater hingga suhu masuk dryer (T_{inlet}): 150°C
- **Suhu umpan padatan masuk (Tf):** 30°C
- **Suhu produk keluar (Tp):** 80°C
- **Suhu referensi:** 0°C
- **Cp padatan kering:** 1,5 kJ/kg.°C
- **Cp air:** 4,18 kJ/kg.°C
- **Cp uap air:** 1,88 kJ/kg.°C
- **Cp udara kering:** 1,005 kJ/kg.°C
- **λ air pada 0°C:** 2501 kJ/kg

1. Neraca Massa

Dasar perhitungan:

Basis: 1 jam operasi

Padatan kering total:

$$F_{\text{dry}} = F \times (1 - Xf) = 10.000 \times (1 - 0,20) = 8.000 \text{ kg/jam}$$

Air dalam umpan (Wf):

$$W_f = 10.000 - 8.000 = 2.000 \text{ kg/jam}$$

Produk kering (P):

Kadar air produk **2% basis basah** → kadar air basis kering:

$$X_p^{\text{dry basis}} = \frac{0,02}{0,98} = 0,02041 \text{ kg air/kg padatan kering}$$

Air dalam produk:

$$W_p = 8.000 \times 0,02041 = 163,28 \text{ kg/jam}$$

Air yang diuapkan (W):

$$W = W_f - W_p = 2.000 - 163,28 = 1.836,72 \text{ kg/jam}$$

Tabel Neraca Massa (kg/jam):

ALIRAN MASUK	kg/jam	ALIRAN KELUAR	kg/jam
1. Umpan Basah	10,000	1. Produk Kering	8,163.28
- Padatan kering	8,000	- Padatan kering	8,000
- Air (cair)	2,000	- Air tersisa	163.28
2. Udara Masuk	79,952	2. Udara Keluar	81,789
- Udara kering	78,771	- Udara kering	78,771
- Uap air (H_1)	1,181	- Uap air (H_2)	3,018*
TOTAL MASUK	89,952	TOTAL KELUAR	89,952

*G = massa udara kering (kg/jam), H_2 = kelembaban udara keluar (kg air/kg ud.kering)

2. Neraca Panas

Menghitung G dan H_2 dari neraca air di udara:

Neraca air di bagian pengering:

$$\begin{aligned} G \cdot H_1 + W &= G \cdot H_2 \\ G(H_2 - 0,015) &= 1.836,72 \dots (1) \end{aligned}$$

Neraca energi (suhu referensi 0°C):

Panas masuk:

1. **Udara**: $G \cdot c_a \cdot T_{\text{inlet}} + G \cdot H_1 \cdot (c_v \cdot T_{\text{inlet}} + \lambda_0)$
 $= G[1,005 \times 150 + 0,015 \times (1,88 \times 150 + 2501)]$
 $= G[150,75 + 0,015 \times 2783]$
 $= 192,495 \cdot G \text{ kJ/jam}$
2. **Umpan padatan**:
Padatan kering: $8.000 \times 1,5 \times 30 = 360.000 \text{ kJ/jam}$
Air dalam umpan (sebagai cair): $2.000 \times 4,18 \times 30 = 250.800 \text{ kJ/jam}$
Total panas umpan = 610.800 kJ/jam

Panas keluar:

1. **Udara keluar** ($T_2=85^\circ\text{C}$):
 $G[1,005 \times 85 + H_2(1,88 \times 85 + 2501)]$
 $= G[85,425 + H_2(159,8 + 2501)]$
 $= G[85,425 + 2660,8H_2]$
2. **Produk padatan**:
Padatan kering: $8.000 \times 1,5 \times 80 = 960.000 \text{ kJ/jam}$
Air dalam produk (cair): $163,28 \times 4,18 \times 80 = 54.600 \text{ kJ/jam}$
Total panas produk = $1.014.600 \text{ kJ/jam}$

Penyusunan neraca panas (masuk = keluar):

$$\begin{aligned} 192,495G + 610.800 &= G(85,425 + 2660,8H_2) + 1.014.600 \\ 192,495G - 85,425G - 2660,8GH_2 &= 1.014.600 - 610.800 \\ \mathbf{107,07G - 2660,8GH_2} &= \mathbf{403.800... (2)} \end{aligned}$$

Selesaikan (1) dan (2):

Dari (1): $H_2 = 0,015 + \frac{1836,72}{G}$

Substitusi ke (2):

$$\begin{aligned} 107,07G - 2660,8G \left(0,015 + \frac{1836,72}{G} \right) &= 403.800 \\ 107,07G - 39,912G - 2660,8 \times 1836,72 &= 403.800 \\ 67,158G - 4.886.773 &= 403.800 \\ 67,158G &= 5.290.573 \\ G &= 78.771 \text{ kg udara kering/jam} \end{aligned}$$

Maka:

$$H_2 = 0,015 + \frac{1836,72}{78.771} = 0,015 + 0,02332 = 0,03832 \text{ kg air/kg udara kering}$$

*udara masuk:

Udara kering: $78,771 \times 1.005 \times 150 = 11,865,000$

Uap air: $78,771 \times 0.015 \times (2501 + 1.88 \times 150) = 3,300,000$

Tabel Neraca Panas (kJ/jam):

PANAS MASUK	Nilai	PANAS KELUAR	Nilai
1. Umpan	610,800	1. Produk	1,014,600
- Padatan	360,000	- Padatan	960,000
- Air cair	250,800	- Air cair	54,600
2. Udara Masuk	15,165,000	2. Udara Keluar	14,761,200
- Udara kering	11,865,000*	- Udara kering	6,725,000
- Uap air	3,300,000	- Uap air	8,036,200
TOTAL MASUK	15,775,800	TOTAL KELUAR	15,775,800

Udara = $192,495 \cdot G \text{ kJ/jam} = 192,495 \times 78.771 \approx 15.165.000$

** $G(85,425+2660,8 \times 0,03832) = 78.771 \times (85,425+102,02) \approx 78.771 \times 187,445 \approx 14.765.000$
(perlu koreksi kecil, tapi masuk $\approx$ keluar)

3. Desain Rotary Dryer

Data untuk desain:

- Laju penguapan air: $W = 1.836,72 \text{ kg/jam}$
- Udara kering: $G = 78.771 \text{ kg/jam}$
- Suhu udara masuk dryer: $T_1 = 150^\circ C$
- Suhu udara keluar: $T_2 = 85^\circ C$
- Suhu bola basah (dari psikrometrik) $\approx 42^\circ C$ (asumsi)

Volume dryer:

Gunakan **laju penguapan per satuan volume (E)** untuk rotary dryer dengan udara panas:
Berdasar literatur, untuk kondisi ini ambil $E = 5 \text{ kg evaporasi/m}^3\cdot\text{jam}$.

$$V = \frac{W}{E} = \frac{1836,72}{5} = 367,3 \text{ m}^3$$

Dimensi (rasio L/D = 6):

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{4} D^2 L = \frac{\pi}{4} D^2 (6D) = 1,5\pi D^3 \\ D^3 &= \frac{367,3}{1,5\pi} = 77,94 \\ D &= \sqrt[3]{77,94} \approx 4,28 \text{ m} \\ L &= 6 \times 4,28 \approx 25,7 \text{ m} \end{aligned}$$

Kecepatan putaran dan kemiringan:

Kecepatan putaran umum: $N = 4 \text{ rpm}$

Kemiringan: $S = 2^\circ$

Waktu tinggal (empiris):

$$t = \frac{0,23L}{SND} \pm \frac{0,6G^{0,9}}{D}$$

Biasanya $\sim 15\text{--}30$ menit

4. Ringkasan Hasil

Parameter	Nilai
Kapasitas umpan basah	10.000 kg/jam
Air diuapkan	1.836,72 kg/jam
Udara kering diperlukan	78.771 kg/jam
Kelembaban udara keluar	0,03832 kg/kg
Volume dryer	367,3 m ³

Parameter	Nilai
Diameter dryer	4,28 m
Panjang dryer	25,7 m
Rasio L/D	6
Estimasi laju penguapan spesifik	5 kg/m ³ .jam

PEMILIHAN MATERIAL ROTARY DRYER

1. Kondisi Operasi yang Mempengaruhi Pemilihan Material:

- **Suhu udara masuk:** 150°C
- **Suhu produk keluar:** 80°C
- **Material yang dikeringkan:** Pupuk ZA (Ammonium Sulphate)
- **pH larutan:** Asam lemah (ammonium sulphate bersifat sedikit asam, pH $\approx$ 4-6)
- **Korosifitas:** Moderate (korosi sulfat, terutama pada kondisi lembab)
- **Abrasi:** Moderate-tinggi (partikel padatan bergesekan dengan dinding)

2. Material yang Direkomendasikan:

Opsi 1: Carbon Ste Material:

ASTM A36 / **A516 Grade 70**

Coating internal: Epoxy phenolic coating (ketebalan 250-500 μ m)

Coating external: Epoxy paint (untuk proteksi atmosfer)

Suhu maksimum: 350°C (aman untuk operasi 150°C) el dengan Coating (Pilihan Ekonomis)

Alasan:

- Tahan terhadap abrasi moderate
- Coating melindungi dari korosi ammonium sulphate
- Biaya lebih rendah dari stainless steel

- Kekuatan tarik cukup untuk shell diameter besar

Opsi 2: Stainless Steel 304L (Pilihan untuk Lifetime Lebih Panjang)

Material: AISI 304L (Low Carbon)

Ketahanan korosi: Excellent terhadap ammonium sulphate

Suhu maksimum: 500°C

Kekuatan: Lebih rendah dari carbon steel, tapi cukup

Kelemahan: Biaya 3-4× lebih mahal dari carbon steel

Opsi 3: Carbon Steel Lined dengan Rubber/FRP (Untuk Abrasi Tinggi)

Shell: Carbon Steel A36

Lining internal: 10-15 mm wear-resistant rubber atau FRP

Alasan jika abrasi sangat tinggi

PERHITUNGAN KETEBALAN DINDING (SHELL)

Data Desain:

- Diameter dalam (D_i): 4.28 m = 4280 mm
- Panjang (L): 25.7 m
- Tekanan operasi: Atmosferik (tekanan internal ≈ 0 barg)
- Tekanan eksternal: 0 barg (tidak ada vakum)
- Beban: Berat sendiri + material + flight + grinding media (jika ada)

Standar yang Digunakan: ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1

A. Ketebalan Minimum untuk Menahan Berat Sendiri:

1. Berat Shell Kosong:

Densitas steel: 7850 kg/m^3

Asumsi ketebalan awal (t): $12 \text{ mm} = 0.012 \text{ m}$

Volume shell:

$$\begin{aligned}V_{\text{shell}} &= \pi \times D_{\text{avg}} \times L \times t \\D_{\text{avg}} &= 4.28 + 0.012 = 4.292 \text{ m} \\V_{\text{shell}} &= \pi \times 4.292 \times 25.7 \times 0.012 = 4.16 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Berat shell:

$$W_{\text{shell}} = 4.16 \times 7850 = 32,656 \text{ kg}$$

2. Berat Material dalam Dryer:

Kapasitas: $\sim 10,000 \text{ kg}$ material

Filling degree: 10-15% volume

Volume material: $367.3 \times 0.15 = 55 \text{ m}^3$

Densitas bulk: 800 kg/m^3 (asumsi)

$$W_{\text{material}} = 55 \times 800 = 44,000 \text{ kg}$$

3. Berat Flight dan Internals:

Estimasi: 20% dari berat shell = $6,531 \text{ kg}$

Total berat (W):

$$W = 32,656 + 44,000 + 6,531 \approx 83,187 \text{ kg}$$

4. Tegangan Bending pada Shell:

Momen bending maksimum (asumsi supported di tengah oleh riding rings):

$$M = \frac{W \times L}{8} = \frac{83,187 \times 9.81 \times 25.7}{8} = 2,620,000 \text{ Nm}$$

Section modulus shell:

$$Z = \frac{\pi}{4} \times D_o^2 \times t$$
$$(D_o = D_i + 2t)$$
$$D_o = 4.28 + 2 \times 0.012 = 4.304 \text{ m}$$
$$Z = \frac{\pi}{4} \times (4.304)^2 \times 0.012 = 0.1747 \text{ m}^3$$

Tegangan bending:

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{2,620,000}{0.1747} = 15.0 \text{ MPa}$$

5. Tegangan Karena Tekanan (minimal, karena tekanan atmosferik):

$$\sigma_p = \frac{P \times D_i}{2t} = \frac{0.1 \times 4280}{2 \times 12} = 17.8 \text{ MPa}$$

(dengan P = 0.1 bar overpressure safety)

6. Tegangan Total:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_b + \sigma_p = 15.0 + 17.8 = 32.8 \text{ MPa}$$

B. Ketebalan Berdasarkan Allowable Stress:

Material: Carbon Steel A516 Gr.70

Allowable stress (S) pada 150°C: 138 MPa (ASME Section II-D)

Ketebalan minimum:

$$t_{\min} = \frac{\sigma_{\text{total}} \times D_i}{2S - \sigma_{\text{total}}} + \text{corrosion allowance}$$
$$t_{\min} = \frac{32.8 \times 4280}{2 \times 138 - 32.8} = \frac{140,384}{276 - 32.8} = \frac{140,384}{243.2} = 577 \text{ mm (ini terlalu besar!)}$$

Koreksi: Rumus di atas untuk tekanan internal tinggi. Untuk beban bending dominan:

Dari tegangan bending maksimum:

$$t = \frac{M}{\pi \times R^2 \times S} (R = D_o/2)$$

Coba iterasi:

Untuk $t = 20 \text{ mm}$:

$$D_o = 4.32 \text{ m}, Z = 0.293 \text{ m}^3$$
$$\sigma_b = 2,620,000/0.293 = 8.94 \text{ MPa}$$
$$\sigma_{\text{total}} = 8.94 + 10.7 = 19.64 \text{ MPa}$$

Safety factor: $138/19.64 = 7.0 \rightarrow \text{AMAN}$

REKOMENDASI FINAL:

Spesifikasi Material dan Ketebalan:

Komponen	Material	Ketebalan	Keterangan
Shell (Body)	ASTM A516 Grade 70	20 mm	Plate thickness
Coating Internal	Epoxy Phenolic	0.5 mm	Ketahanan korosi+abrasi
Coating External	Epoxy Paint	0.2 mm	Proteksi atmosfer
Riding Rings	ASTM A36 forged	50-75 mm	Tempat support rollers
Tire (Support)	Cast Steel	100-150 mm	Mengambil beban shell
Girth Gear	Alloy Steel AISI 4140	Module 20-25	Transmisi putaran
Flights (Lifter)	ASTM A36 + Hardface	12-15 mm	Untuk lifting material
Inlet/Outlet	SS 304L	10 mm	Area korosi tinggi

Corrosion Allowance:

- Untuk carbon steel tanpa coating: 3 mm/tahun (untuk ammonium sulphate)
- Dengan coating yang baik: 1.5 mm untuk lifetime 10-15 tahun
- **Rekomendasi:** Tambah 2 mm untuk corrosion allowance

Ketebalan Total Shell:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{structural}} + t_{\text{corrosion allowance}} = 18 + 2 = 20 \text{ mm}$$

Perhitungan Berat Akhir Shell:

Dengan $t = 20 \text{ mm} = 0.020 \text{ m}$:

$$\begin{aligned} V_{\text{shell}} &= \pi \times 4.30 \times 25.7 \times 0.020 = 6.94 \text{ m}^3 \\ W_{\text{shell}} &= 6.94 \times 7850 = 54,479 \text{ kg } (\approx 54.5 \text{ ton}) \end{aligned}$$

FAKTOR PENGUJIAN DAN INSPEKSI:

1. NDT (Non-Destructive Testing):

- 100% radiographic testing untuk longitudinal seams
- Spot radiography untuk circumferential seams
- Dye penetrant testing untuk attachment welds

2. Stress Relieving:

- Diperlukan karena ketebalan $> 16 \text{ mm}$
- Temperature: $600\text{-}650^\circ\text{C}$
- Holding time: 1 jam per 25 mm thickness

3. Toleransi Dimensional:

- Out-of-roundness: maksimum 1% dari diameter
- Straightness: maksimum 10 mm deviasi dari centerline

4. Finishing:

- Internal: Blast cleaning SA 2.5 + coating
- External: Sandblast + primer + top coat

ANALISIS BIAYA MATERIAL (Perkiraan):

Material Option	Ketebalan	Biaya per kg	Total Biaya Material	Lifetime
Carbon Steel + Coating	20 mm	\$1.2-1.5/kg	\$65,000-82,000	10-15 tahun
Stainless Steel 304L	16 mm	\$4.5-5.5/kg	\$245,000-300,000	20+ tahun
CS + Rubber Lining	18 mm + 12 mm	\$2.8-3.5/kg	\$152,000-190,000	15-20 tahun

Rekomendasi: Carbon Steel dengan coating epoxy phenolic (paling ekonomis dengan lifetime memadai).

KESIMPULAN:

1. **Material utama:** Carbon Steel ASTM A516 Grade 70
2. **Ketebalan shell:** 20 mm (18 mm structural + 2 mm corrosion allowance)
3. **Coating:** Epoxy phenolic internal (0.5 mm), epoxy paint external
4. **Pertimbangan khusus:** Welding procedure qualification, post-weld heat treatment, dan regular inspection untuk coating integrity

Dengan desain ini, dryer akan memiliki faktor keamanan >7, tahan korosi untuk ammonium sulphate, dan umur desain minimal 15 tahun dengan maintenance yang tepat.