

2. TEORI DASAR

2.1. *Screen Printing*

Screen printing yaitu proses pemindahan zat warna melalui media yang tembus zat warna (*screen*). Proses *screen printing* digunakan untuk memindahkan zat warna yang berupa gambar ke permukaan benda kerja yang akan diwarnai, yang dapat berupa plastik, kain, kertas, logam, kulit, imitasi kulit, kayu, karet, kaca, atau benda-benda lain dengan permukaan yang padat.

Perlengkapan utama yang dibutuhkan untuk melakukan proses *screen printing* antara lain: *screen*, rakel dan cat yang sesuai. *Screen* terdiri dari dua bagian yaitu rangka *screen* dan gasa *screen*. Rangka *screen* yaitu berupa konstruksi rangka yang nantinya menjadi tempat melekatkan gasa *screen* dan juga menjadi tempat untuk menampung cat. Rangka *screen* dapat dibuat dari bahan kayu atau logam. Untuk mendapatkan hasil *screen printing* yang baik, maka rangka *screen* harus memenuhi beberapa persyaratan :

1. Tidak boleh berubah bentuk karena perubahan temperatur
2. Tidak boleh berubah bentuk pada saat basah maupun kering
3. Rangka harus bebas dari permukaan kasar
4. Bagian rangka yang menempel dengan gasa *screen* harus halus
5. Tahan terhadap zat kimia yang dipergunakan untuk proses *screen printing*.

Sedangkan sebagai gasa *screen* dapat dipakai bahan sutera, serat-serat polyester, organdi, katun, *nylon*, *phospor bronze*, *monyl*, *nytal*, *nybolt* dan lain-lain. Ukuran gasa bermacam-macam yang diberi nomor berdasarkan kekasaran dan kehalusannya. Ukuran ini menentukan jumlah lubang tiap satuan luas. Makin tinggi nomor berarti makin banyak lubang tiap ukuran tertentu, yang berarti gasa makin halus atau kerapatannya semakin tinggi. Gasa *screen* haruslah memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

1. Mempunyai daya tarik yang tinggi
2. Tidak mengembang atau menyusut dalam keadaan basah atau kering
3. Tahan terhadap bahan-bahan kimia
4. Mudah dibersihkan

Rakel adalah alat yang dipergunakan untuk menekan/memaksakan tinta/cat/pasta kepada benda kerja yang disablon melalui *screen*. Rakel dibuat dari kayu keseluruhan, kayu yang dilengkapi dengan karet, atau kayu yang dilengkapi dengan plat logam. Panjang rakel kurang lebih 3-4 cm lebih pendek daripada lebar *screen*, hal ini agar cat selalu terbawa oleh rakel dan *screen* tidak cepat rusak. permukaan rakel harus benar-benar rata dan lurus. Pemakaian rakel tergantung dari bahan yang akan *warna* dan lapisan permukaan meja *screen printing*. Bentuk rakel ada bermacam-macam, antar lain:

1. Persegi panjang
2. Lancip
3. Setengah lancip
4. Bulat

Proses *screen printing* ada beberapa tahap. Tahap pertama yaitu persiapan yang meliputi penyetingan posisi *screen* dengan benda kerja, hal ini sangat penting agar hasil *screen printing* baik. Tahap selanjutnya adalah proses penekanan cat dengan menggunakan rakel. Rakel harus membawa cat untuk mengisi *screen* dan siap untuk penwarnaan berikutnya. Setelah cat menempel pada benda kerja, *screen* diangkat dan benda kerja dipindahkan untuk proses pengeringan. Untuk beberapa warna, sebaiknya didahulukan warna yang lebih muda.

2.2. Analisa Tegangan Material

2.2.1. Bebandan Tegangan

Pembebanan pada suatu material atau suatu elemen mesin dapat dikelompokkan dengan melihat waktu yang berlangsung dari pembebanan tersebut (Hamrock,1999,p.30), yaitu:

- a. Beban statis (*static load*), yaitu beban yang secara bertahap ditambahkan dan kesetimbangan dapat dicapai dalam waktu yang singkat. Struktur tidak mengalami efek dinamis.
- b. Beban tertahan (*sustained load*), seperti pada berat suatu struktur, nilainya tetap untuk waktu yang lama.
- c. Beban kejut (*impact load*), beban diberikan dalam waktu yang sangat singkat.

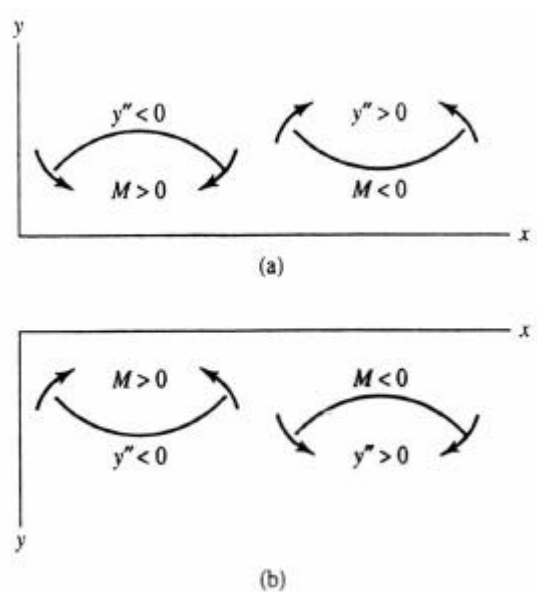
- d. Beban siklus (*cyclic load*), beban dapat bervariasi bahkan dapat berbalik arah dan mempunyai karakter periode terhadap waktu.

Beban dapat juga dikelompokkan berdasar luasan di mana beban diberikan, yaitu:

- Beban konsentrasi (*concentrated load*), yaitu bila luasan dari beban jauh lebih kecil apabila dibandingkan dengan luasan elemen yang dibebani.
- Beban distribusi (*distributed load*), yaitu bila beban tersebar keseluruhan area.

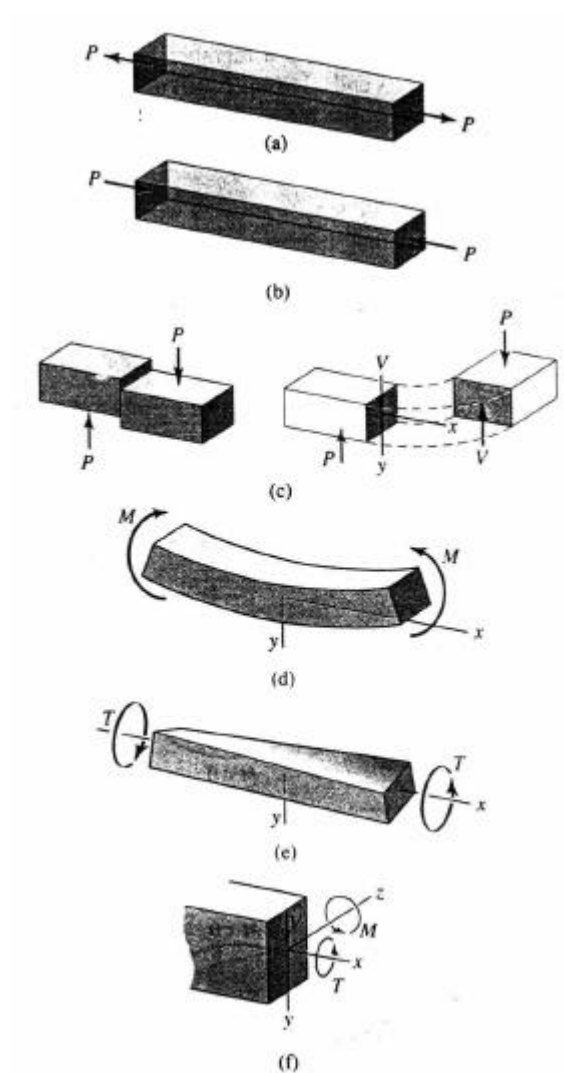
Secara lebih lanjut, beban dapat dikelompokkan berdasarkan lokasi dan metode aplikasi :

- Beban normal (*normal load*). Arah beban tegak lurus terhadap penampang tahanan. Beban normal dapat berupa beban tarik atau tekan.
- Beban geser (*shear load*). Apabila beban searah dengan penampang tahanan.
- Beban momen tekuk (*bending load*). Apabila beban diterapkan secara transversal terhadap sumbu longitudinal elemen.



Gambar 2.1. Perjanjian Tanda Arah Beban Bending

- Beban momen puntir (*torsion load*). Beban berupa gerak terpilin (*twisting motion*)
- Beban kombinasi (*combined load*). Apabila merupakan kombinasi dari beberapa beban yang sudah disebutkan sebelumnya.



Gambar 2.2. Klasifikasi Beban Berdasar Lokasi dan Metode Aplikasi

(a) beban tarik;(b) beban tekan;(c) beban geser;(d) beban tekuk;

(e)beban puntir;(f) beban kombinasi

Masing-masing beban yang bekerja pada suatu luasan akan mengakibatkan timbulnya tegangan, baik tegangan normal(?) maupun tegangan geser (?).

a. Beban Tarik $\sigma_t = \frac{F}{A}$

b. Beban Tekan $\sigma_c = \frac{F}{A}$

- c. Beban Geser $\tau = \frac{F}{A}$
- d. Momen Tekuk $\tau_b = \frac{M_b c}{I}$
- e. Momen Puntir $\tau_t = \frac{T c}{J}$

di mana,

σ = tegangan normal (N/m²; Pa)

τ = tegangan geser (N/m²; Pa)

F = gaya (N)

A = luasan (m²)

M_b = momen tekuk (Nm)

T = torsi (Nm)

c = jarak dari *natural axis* (m)

I = inersia luasan (m⁴)

J = momen tahanan polar (m⁴)

2.2.2. Teori Kegagalan Material

Mengingat sangatlah tidak mungkin untuk menguji setiap material untuk setiap kombinasi tegangan, maka diperlukan teori kegagalan untuk membuat prediksi dengan dasar performa material yang didapat dari hasil uji tarik (Juvinal, 2000, p.250). Beberapa teori kegagalan yaitu (Hamrock, 1999, p.235):

2.2.2.1. Maximum Shear Stress Theory (MSST)

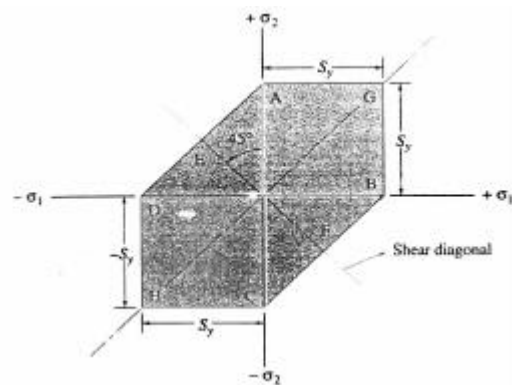
Teori ini disebut juga kriteria *yield* Tresca. Teori ini mengatakan bahwa sebuah elemen yang dikenai beberapa macam tegangan kombinasi akan mengalami kegagalan (oleh *yielding* atau *fracturing*) apabila nilai tegangan geser maksimum melebihi nilai kritis. Nilai kritis didapat dari uji tegangan uniaksial. apabila $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ digunakan sebagai tegangan prinsipal, maka MSST mengatakan bahwa *yielding* akan muncul saat:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq \frac{S_y}{n_s}$$

di mana,

S_y = tegangan luluh material

n_s = angka keamanan



Gambar 2.3. Grafik Daerah *Maximum Shear Stress Theory* (MSST) untuk Tegangan Biaksial $\sigma_z = 0$

2.2.2.2 *Distortion Energy Theory* (DET)

Teori ini juga dikenal sebagai kriteria kegagalan Von Mises, yang menyatakan bahwa kegagalan material disebabkan karena energi elastis yang bergabung dengan deformasi geser. Teori ini tepat untuk material ulet dan untuk memprediksi yielding dibawah kombinasi tegangan dengan akurasi yang lebih baik daripada teori kegagalan yang lain. DET memprediksi kegagalan apabila:

$$\sigma_e \leq \frac{S_y}{n_s}$$

di mana,

σ_e = tegangan Von Mises

Untuk tegangan triaksial

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + \sigma_2^2 - \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3^2 + \sigma_3^2 - \sigma_3\sigma_1 + \sigma_1^2 \right)^{1/2}$$

Untuk tegangan biaksial, mengasumsikan $\sigma_3 = 0$

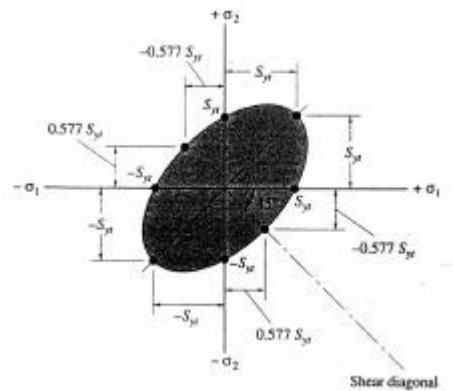
$$\sigma_e = \left(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + \sigma_2^2 - \sigma_2\sigma_1 + \sigma_1^2 \right)^{1/2}$$

Apabila tegangan langsung bentuk σ_x , σ_y , dan σ_{xy} lebih siap dipakai, maka:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + 3\sigma_{xy}^2}^{1/2}$$

Jika hanya tegangan σ_x dan σ_{xy} yang ada maka persamaan menjadi

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x^2 + 3\sigma_{xy}^2)}$$



Gambar 2.4. Grafik Daerah *Distortion Energy Theory* (DET) untuk Tegangan Biaksial
 $\sigma_z = 0$

2.2.2.3. *Maximum Normal Stress Theory* (MNST)

Teori ini menyatakan bahwa sebuah elemen yang dikenai beberapa macam tegangan kombinasi akan mengalami kegagalan apabila tegangan prinsipal positif terbesar melebihi tegangan luluh tarik atau apabila tegangan prinsipal negatif terbesar melebihi tegangan luluh kompresi. Teori ini bekerja sangat baik untuk material getas yang berserat dan beberapa jenis kaca. Kegagalan akan muncul dengan MNST bila:

$$\sigma_1 \geq S_{ut} / n_s$$

$$\sigma_3 \leq -S_{uc} / n_s$$

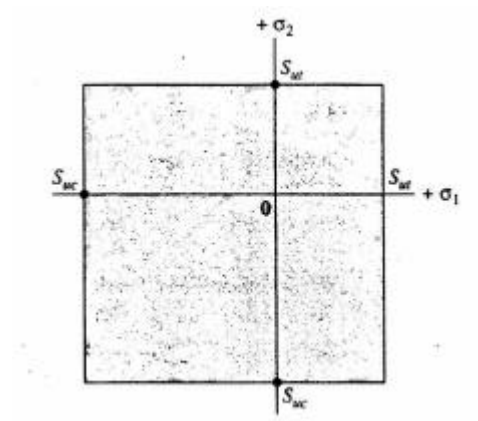
di mana,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tegangan normal prinsipal

S_{ut} = tegangan *ultimate* uniaksial pada tarik

S_{uc} = tegangan *ultimate* uniaksial pada kompresi

n_s = angka keamanan



Gambar 2.5. Grafik Daerah *Maximum Normal Stress Theory* (MNST) untuk Tegangan Biaksial $\sigma_z \neq 0$

2.2.2.4. *Internal Friction Theory* (IFT)

Teori ini merupakan penyempurnaan dari MNST untuk material getas, karena tegangan pada kompresi jauh lebih besar daripada tegangan tariknya. Oleh karena itu tegangan tarik dan kompresi dipisah pada perumusannya.

$$\text{Jika } \sigma_1 \neq 0 \text{ dan } \sigma_3 \neq 0, \quad \frac{\sigma_1}{S_{ut}} + \frac{\sigma_3}{S_{uc}} \leq \frac{1}{n_s}$$

$$\text{jika } \sigma_3 \neq 0, \quad \sigma_1 \leq \frac{S_{ut}}{n_s}$$

$$\text{jika } \sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_3 \leq \frac{S_{uc}}{n_s}$$

di mana,

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ = urutan tegangan normal prinsipal

S_{ut} = tegangan *ultimate* uniaksial pada tarik

S_{uc} = tegangan *ultimate* uniaksial pada kompresi

n_s = angka keamanan

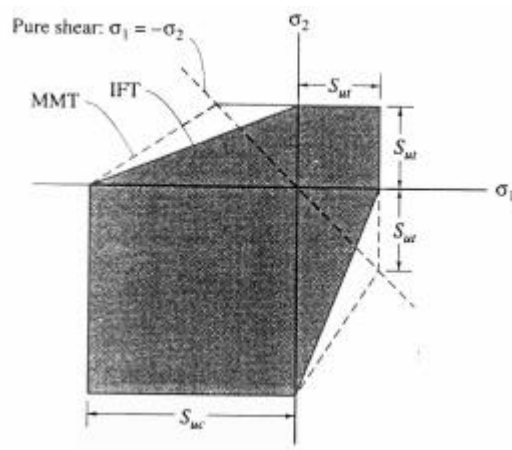
2.2.2.5 *Modified Mohr Theory* (MMT)

IFT lebih berbasis analitis, sedangkan MMT didapatkan dengan memasukkan data hasil uji. Teori ini memprediksi material getas paling baik

Jika $\sigma_1 \geq 0$ dan $\sigma_3 \leq -S_{ut}$,
$$\sigma_1 \leq \frac{S_{ut} \sigma_3}{S_{uc} + S_{ut}} + \frac{S_{uc} S_{ut}}{n_s S_{uc} + S_{ut}}$$

jika $\sigma_3 \leq -S_{ut}$,
$$\sigma_1 \leq \frac{S_{ut}}{n_s}$$

jika $\sigma_1 \geq 0$,
$$\sigma_3 \leq \frac{S_{uc}}{n_s}$$



Gambar 2.6. Grafik Daerah *Internal Friction Theory* (IFT) dan *Modified Mohr Theory* (MMT) untuk Material Getas

2.2.3. Angka Keamanan

Nilai angka keamanan didapat dari (Hamrock, 1999, p.8)

$$n_s = \frac{\sigma_{all}}{\sigma_d}$$

di mana,

σ_{all} = tegangan normal yang diijinkan (*allowable normal stress*) (Pa)

σ_d = tegangan normal desain (Pa)

Bila $n_s > 1$, maka desain sudah mencukupi. Semakin besar n_s maka desain semakin aman.

Bila $n_s < 1$, maka desain tidak mencukupi dan diperlukan re-desain. Cara lain untuk menentukan angka keamanan yaitu

$$n_s = n_{sx} n_{sy}$$

di mana,

n_{sx} = angka keamanan yang melibatkan karakteristik A, B, dan C

- A = kualitas material, pengerjaan, perawatan, dan inspeksi
- B = kontrol *over load* yang diterapkan pada bahan
- C = keakurasian analisa tegangan, data eksperimen, atau pengalaman dengan bahan sejenis
- n_{sy} = angka keamanan yang melibatkan karakteristik D dan E
- D = keamanan untuk manusia
- E = dampak ekonomi

Tabel 2.1. Angka keamanan karakteristik A, B, dan C

Characteristic ^a		B =			
		vg	g	f	p
A = vg	C = { vg	1.1	1.3	1.5	1.7
	g	1.2	1.45	1.7	1.95
	f	1.3	1.6	1.9	2.2
	p	1.4	1.75	2.1	2.45
A = g	C = { vg	1.3	1.55	1.8	2.05
	g	1.45	1.75	2.05	2.35
	f	1.6	1.95	2.3	2.65
	p	1.75	2.15	2.55	2.95
A = f	C = { vg	1.5	1.8	2.1	2.4
	g	1.7	2.05	2.4	2.75
	f	1.9	2.3	2.7	3.1
	p	2.1	2.55	3.0	3.45
A = p	C = { vg	1.7	2.15	2.4	2.75
	g	1.95	2.35	2.75	3.15
	f	2.2	2.65	3.1	3.55
	p	2.45	2.95	3.45	3.95

^avg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.
A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.
B = control over load applied to part.
C = accuracy of stress analysis, experimental data, or experience with similar parts.

Tabel 2.2. Angka keamanan karakteristik D dan E

Characteristic ^a		D =		
		ns	s	vs
E = {	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	vs	1.2	1.4	1.6

^avs = very serious, s = serious, and ns = not serious
D = danger to personnel.
E = economic impact

Beberapa nilai angka keamanan yang direkomendasikan berdasarkan tegangan luluh (Juvinall, 2000, p.263):

1. $n_s = 1.25$ sampai 1.5 digunakan untuk material yang dapat diandalkan dan bekerja dibawah kondisi yang dapat dikontrol (beban dan tegangan ditentukan dengan pasti)
2. $n_s = 1.5$ sampai 2.0 untuk material yang sudah dikenal bekerja pada kondisi lingkungan konstan, dikenai beban dan tegangan yang sudah dapat ditentukan
3. $n_s = 2.0$ sampai 2.5 untuk material rata-rata dengan kondisi kerja lingkungan biasa yang dikenai beban dan tegangan yang dapat ditentukan
4. $n_s = 2.5$ sampai 3.0 untuk material yang sedikit dicoba atau material getas dibawah kondisi lingkungan, beban, dan tegangan rata-rata.
5. $n_s = 3.0$ sampai 4.0 untuk material yang tidak pernah dicoba dibawah kondisi lingkungan, beban, dan tegangan rata-rata.

2.2.4. Defleksi Balok

Balok (*beam*) adalah bagian struktural yang dikenai beban melintang. Sebuah balok lebih membutuhkan penampang melintang untuk mengatasi defleksi daripada untuk mengatasi tegangan. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk perhitungan defleksi balok antara lain : metode integrasi, metode fungsi singular, metode superposisi dan teori *Castigliano*. Persamaan dasar untuk penyelesaian perhitungan defleksi balok yaitu persamaan turunan yang menyatakan intensitas beban, gaya geser, momen, kelengkungan, serta lendutan yang dinyatakan dengan urutan sebagai berikut:

$$\text{Intensitas beban pada sembarang titik } x = \frac{d^4 y}{dx^4} EI \quad w \quad (\text{N/m})$$

$$\text{Gaya geser pada sembarang titik } x = \frac{d^3 y}{dx^3} EI \quad V \quad (\text{N})$$

$$\text{Momen tekuk pada sembarang titik } x = \frac{d^2 y}{dx^2} EI \quad M \quad (\text{Nm})$$

$$\text{Lengkungan pada sembarang titik } x = \frac{dy}{dx} \quad ? \quad (\text{rad})$$

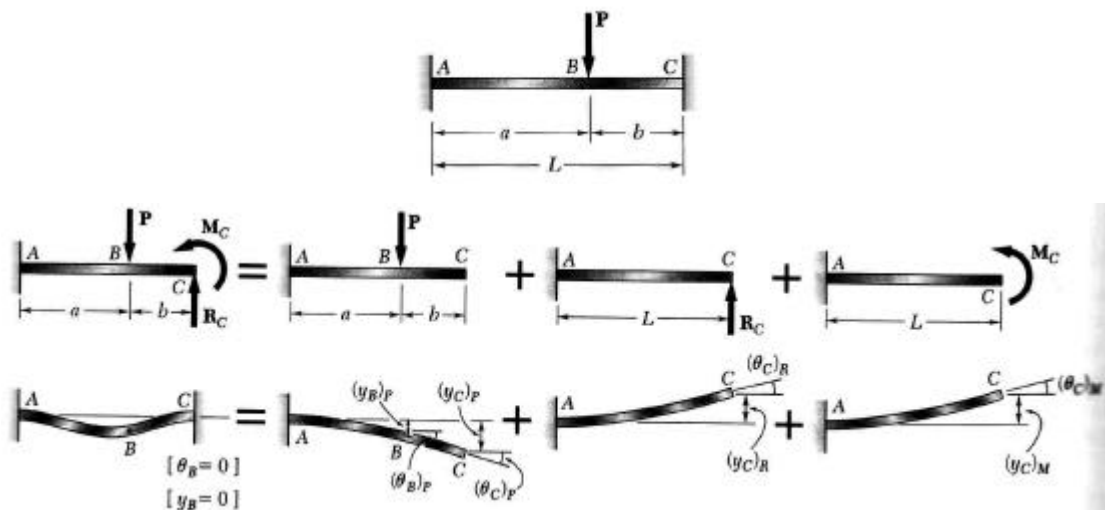
$$\text{Defleksi pada sembarang titik } x = y \quad (\text{m})$$

2.2.4.1. Metode superposisi

Defleksi pada suatu titik merupakan penjumlahan dari masing-masing defleksi yang terjadi di titik tersebut yang diakibatkan oleh tiap pembebanan (Hamrock,1999,p.192). Langkah ini disebut metode superposisi. Jadi apabila sebuah batang tertekuk karena n jumlah gaya yang terpisah, maka defleksi yang terjadi pada suatu titik tertentu adalah penjumlahan dari n jumlah defleksi, satu untuk tiap gaya. Untuk n beban yang berbeda:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = EI \frac{d^2}{dx^2} (y_1 + y_2 + \dots + y_n) = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

Contoh untuk penyelesaian defleksi batang dengan metode superposisi adalah sebagai berikut:



Gambar 2.7. Contoh Penyelesaian Metode Superposisi

Persamaan defleksi untuk berbagai macam kondisi pembebanan dapat dilihat pada lampiran 7.

2.2.4.2. Teori Castigliano

Teori Castigliano menyatakan bahwa apabila sebuah bodi terdeformasi elastik oleh sebuah sistem gaya, maka defleksi pada sembarang titik sebanding dengan turunan parsial energi regangan (*strain energy*) terhadap beban.

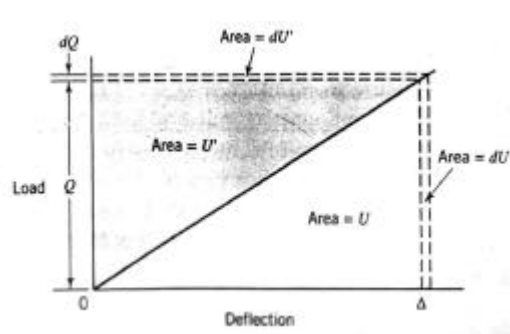
$$y_i = \frac{\partial U}{\partial Q_i}$$

di mana,

y_i = defleksi pada titik tertentu

U = energi regangan

Q_i = beban yang terjadi pada titik tertentu



Gambar 2.8. Kurva Defleksi untuk Daerah Elastis

Tabel 2.3. Energi Regangan untuk Empat Macam Kondisi Pembebanan

Loading type	Factors involved	Strain energy for special case where all three factors are constant with x	General expression for strain energy
Axial	P, E, A	$U = \frac{P^2 l}{2EA}$	$U = \int_0^l \frac{P^2}{2EA} dx$
Bending	M, E, I	$U = \frac{M^2 l}{2EI}$	$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx$
Torsion	T, G, J	$U = \frac{T^2 l}{2GJ}$	$U = \int_0^l \frac{T^2}{2GJ} dx$
Transverse shear (rectangular section)	V, G, A	$U = \frac{3V^2 l}{5GA}$	$U = \int_0^l \frac{3V^2}{5GA} dx$

2.3. Pegas

Pegas adalah elemen mesin yang fleksibel digunakan untuk menahan gaya atau torsi dan pada saat yang bersamaan untuk menyimpan energi. Energi tersebut disimpan dalam bentuk tekukan, rentangan, ataupun kompresi. Energi tersebut dapat dipulihkan

dengan pengembalian elastis material yang terdistorsi. Pegas harus mempunyai kemampuan menahan defleksi yang besar secara elastis. Fungsi dari pegas antara lain :

- Untuk menyimpan dan mengembalikan energi.
- Untuk memberikan dan menahan gaya tertentu
- Untuk mengisolasi getaran
- Untuk mengindikasikan atau mengontrol beban.
- Untuk mengembalikan atau memindahkan komponen

Kekuatan(*strength*) adalah karakteristik terpenting dalam pemilihan material untuk pegas. Kekuatan maksimum (*ultimate strength*) material pegas bervariasi tergantung dari ukuran kawat pegas.

$$S_{ut} \propto A_p / d^m$$

di mana,

A_p = potongan garis lurus (*intercept of straight line*)

m = kemiringan (*slope*)

Tabel 2.4. Koefisien untuk beberapa material pegas

Material	Size range		Exponent, m	Constant, A_p	
	in.	mm		ksi	MPa
Music wire ^a	0.004–0.250	0.10–6.5	0.146	196	2170
Oil-tempered wire ^b	0.020–0.500	0.50–12	0.186	149	1880
Hard-drawn wire ^c	0.028–0.500	0.70–12	0.192	136	1750
Chromium vanadium ^d	0.032–0.437	0.80–12	0.167	169	2000
Chromium silicone ^e	0.063–0.375	1.6–10	0.112	202	2000

^aSurface is smooth and free from defects and has a bright, lustrous finish.

^bSurface has a slight heat-treating scale that must be removed before plating.

^cSurface is smooth and bright with no visible marks.

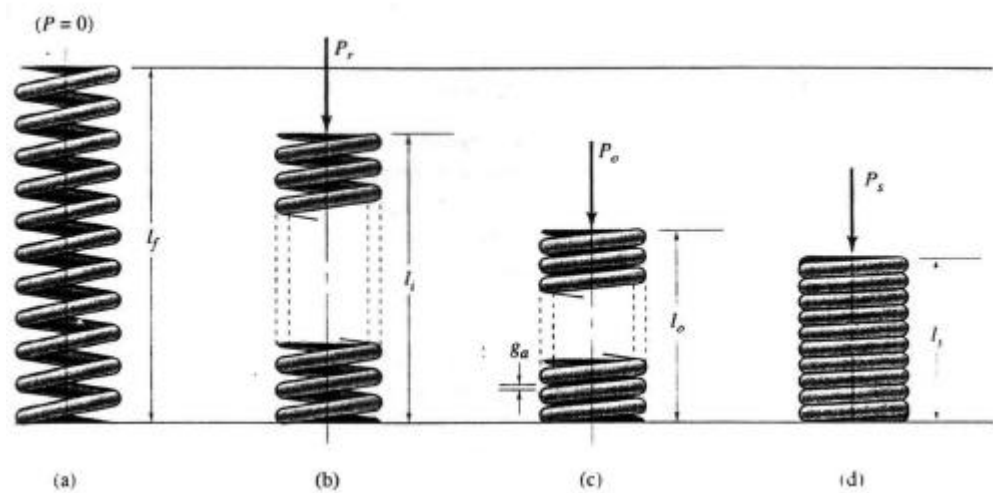
^dAircraft-quality tempered wire; can also be obtained annealed.

^eTempered to Rockwell C49 but may also be obtained untempered.

Dalam mendesain sebuah pegas, tegangan yang diijinkan adalah tegangan luluh torsional daripada kekuatan maksimum. Setelah kekuatan maksimum didapat dari persamaan diatas, maka tegangan geser yang diijinkan adalah:

$$S_{sy} \propto S_{all} \propto 0.40 S_y$$

Kondisi pembebanan untuk pegas kompresi:



Gambar 2.9. Beberapa Kondisi Pegas Karena Pembebanan (a) tanpa beban; (b) beban awal; (c) beban kerja; (d) beban maksimum pegas mampat

Beberapa rumus untuk merancang pegas:

a. Defleksi pegas

$$\delta = \frac{8FD^3N_a}{d^4G}$$

di mana,

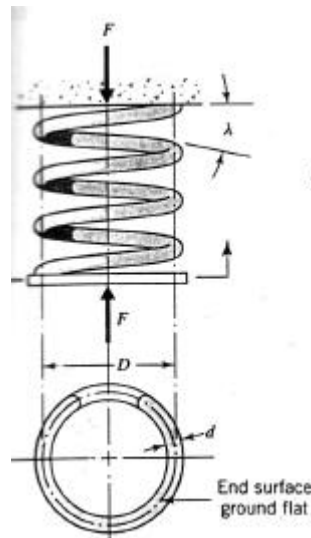
F = beban (N)

D = diameter rata-rata lingkaran pegas (m)

d = diameter kawat (m)

N_a = Jumlah lilitan aktif

G = modulus geser elastisitas (Pa)



Gambar 2.10. Variabel Dimensi Pegas

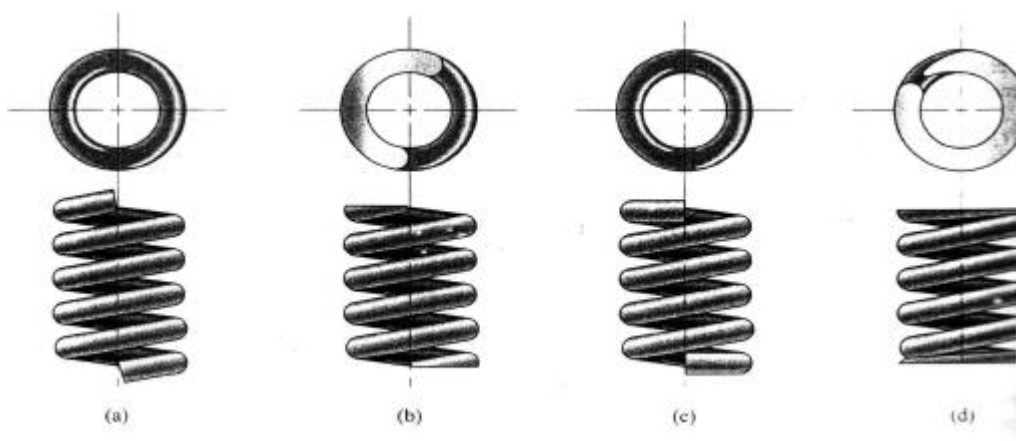
b. Konstanta pegas (*spring rate*)

$$k = \frac{F}{\Delta} = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad \text{atau} \quad k = \frac{dG}{8N_a C^3}$$

di mana,

$C = D/d =$ indeks pegas

Kondisi dari ujung pegas juga sangat mempengaruhi dalam penentuan dimensi pegas, misalnya jumlah lilitan, panjang bebas (l_f), panjang mampat (l_k), dan jarak antar lilitan (*pitch*)



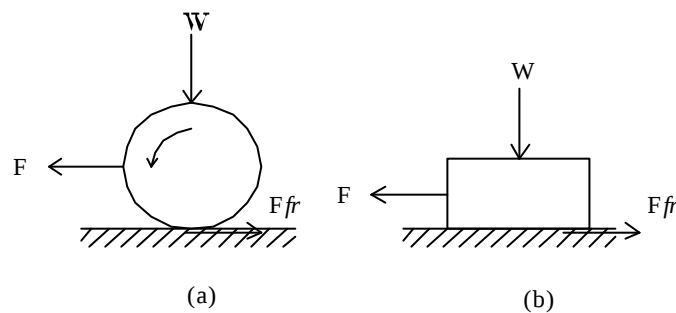
Gambar 2.11. Empat Macam Kondisi Ujung Pegas. (a) polos; (b) polos dan diratakan; (c) lurus; (d) lurus dan diratakan

Tabel 2.5. Rumus-rumus untuk Pegas Kompresi dengan Beberapa Kondisi Ujung

Term	Type of spring end			
	Plain	Plain and ground	Squared or closed	Squared and ground
Number of end coils, N_e	0	1	2	2
Total number of coils, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Free length, l_f	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Solid length, l_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Pitch, p	$(l_f - d)/N_a$	$l_f/(N_a + 1)$	$(l_f - 3d)/N_a$	$(l_f - 2d)/N_a$

2.4 Gesekan

Friksi / gesekan dapat dilihat sebagai gaya yang melawan gerakan relatif antar permukaan yang bersinggungan. Dua pembagian utama dari gesekan yaitu *sliding* dan *rolling*. Gesekan *rolling* melibatkan permukaan yang non-konformal sedangkan permukaan *sliding* adalah konformal.

Gambar 2.12. Gaya Gesek Dalam (a) *rolling* dan (b) *sliding*

Pada kedua macam gesekan dibutuhkan gaya tangensial F agar elemen bagian atas dapat bergerak terhadap elemen bagian bawah yang tetap, yaitu yang besarnya sebanding dengan gaya gesek F_{fr} yang ditimbulkan akibat kontak antar dua permukaan tersebut. Perbandingan antara gaya yang dibutuhkan dengan gaya normal elemen W disebut koefisien gesekan.

$$\mu = \frac{F}{W}$$

Nilai dari koefisien gesek untuk beberapa material ditunjukkan pada lampiran 1. Gesekan dapat diperkecil dengan menggunakan material rendah gesekan atau dengan memberikan pelumasan pada permukaan. Dengan mengurangi gesekan yang terjadi maka keausan dan

panas yang terjadi juga akan berkurang, sehingga usia dari elemen mesin dapat menjadi lebih lama.

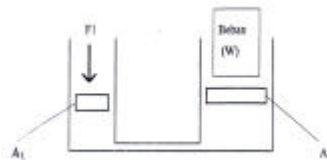
Tiga hukum gesekan (Hamrock,1999,p.338)yaitu:

1. Gaya gesek sebanding besarnya dengan gaya normal yang terjadi
2. Gaya gesek tidak bergantung pada luasan permukaan kontak dan tidak bergantung pada ukuran elemen
3. Gaya gesek tidak bergantung pada kecepatan *sliding*

Dua hukum yang pertama berlaku untuk material logam yang saling bergesekan namun tidak berlaku apabila yang bergesekan adalah material polimer. Gaya gesek yang dibutuhkan untuk memulai menggerakkan benda adalah lebih besar daripada gaya yang dibutuhkan untuk mempertahankan gerakan, jadi koefisien gesek statis μ_s lebih besar daripada koefisien gesek dinamis μ_d . Saat setelah bergerak, μ_d tidak bergantung pada kecepatan gerak benda.

2.5. Pneumatik

Sistem pneumatik merupakan pemindahan gaya dan gerak dengan memanfaatkan udara bertekanan. Hukum yang berlaku adalah Hukum Pascal yang mengatakan bahwa apabila kita memberi tekanan pada fluida statik, maka tekanan atau gaya tersebut akan dialirkan ke segala arah menekan dinding tempat fluida itu berada.



Gambar 2.13. Hukum Pascal

Hukum Pascal dapat ditulis :

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

di mana: F_1 = gaya yang dihasilkan piston 1

A_1 = luas penampang piston 1

F_2 = gaya yang dihasilkan piston 2

A_2 = luas penampang piston 2

Jika tekanan udara supply adalah p , maka:

$$F_1 = p \cdot A_1$$

$$F_2 = p \cdot A_2$$

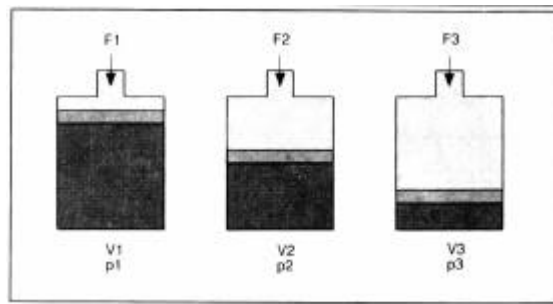
Kerja yang dilakukan (U) untuk menggerakkan beban (W) adalah:

$$U = F_2 \cdot L$$

di mana L = langkah/stroke yang dilakukan oleh aktuator

Sedangkan pada udara yang dimampatkan berlaku hubungan antara Tekanan dan volume sesuai dengan Hukum Boyle-Mariotte yaitu : Volume dari massa gas yang tertutup pada temperatur konstan adalah berbanding terbalik dengan tekanan absolut atau hasil kali dari volume dan tekanan absolut adalah konstan untuk massa gas tertentu.

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 = p_3 \times V_3 = \text{konstan}$$



Gambar 2.14. Hukum Boyle-Mariotte

Beberapa komponen penyusun rangkaian sistem pneumatik:

- ✍ Kompresor : penghasil udara bertekanan
- ✍ Pressure regulator : pengatur besar tekanan kerja
- ✍ Pressure gauge : penunjuk besar tekanan
- ✍ Filter udara : penyaring udara yang keluar dari kompresor
- ✍ Dryer : penghilang kadar air dalam udara yang disalurkan
- ✍ Lubricator : menyalurkan minyak berupa kabut
- ✍ Valve : pengatur arah tekanan
- ✍ Aktuator : penggerak dari mekanisme yang diinginkan
- ✍ Limit switch : membatasi gerak aktuator
- ✍ Flow control : pengatur laju aktuator

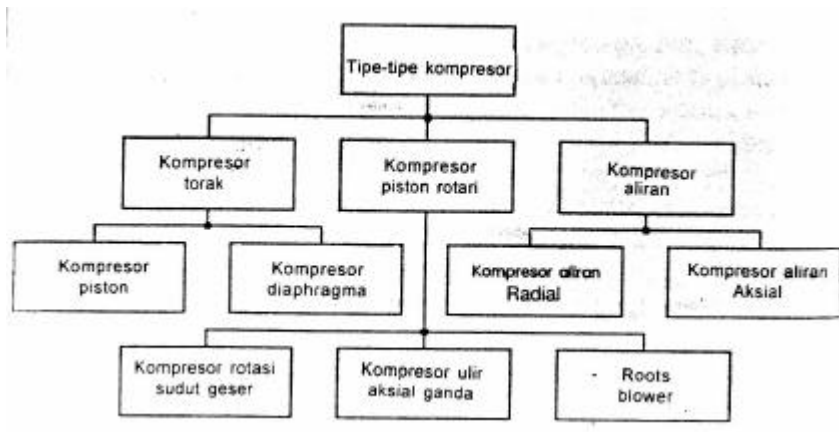
Dalam rangkaian instalasi, komponen-komponen penyusun tersebut diwakili dengan gambar dan simbol yang terdapat pada lampiran 2-5.

2.5.1. Pengadaan udara dan distribusi

Supaya dapat menjamin keandalan pengendalian pneumatik harus disediakan udara yang kualitasnya memadai. Termasuk didalamnya adalah faktor-faktor sebagai berikut : udara yang bersih, kering dan tekanan yang tepat. Komponen-komponen untuk pengadaan udara tersebut adalah:

a. Kompresor udara

Pemilihan jenis kompresor tergantung dari jumlah udara yang dibutuhkan, tekanan, kualitas, kebersihan, dan bagaimana pengeringannya.

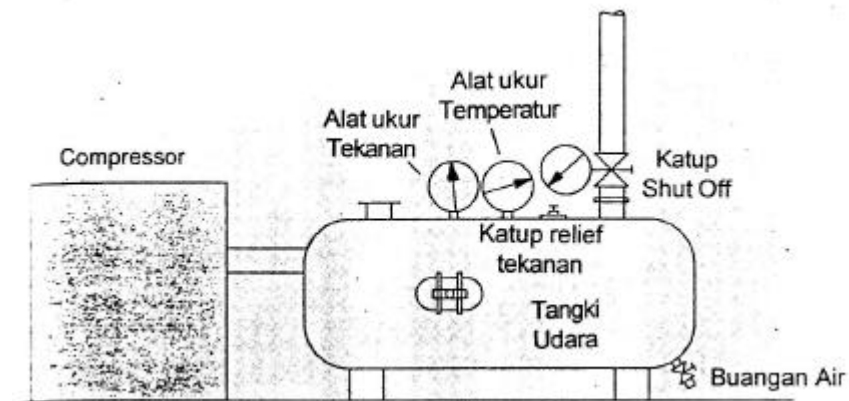


Gambar 2.15. Berbagai Jenis Kompresor

b. Tangki udara

Tangki menghasilkan tekanan udara yang konstan didalam sistem pneumatik tanpa memperhatikan pemakaian yang berubah-ubah. Ukuran tangki udara bertekanan tergantung dari:

- ✍ Volume udara yang ditarik ke dalam kompresor
- ✍ Pemakaian (konsumsi) udara
- ✍ Ukuran saluran
- ✍ Jenis dari pengaturan siklus kerja kompresor
- ✍ Penurunan tekanan yang diperkenan dari jaringan saluran



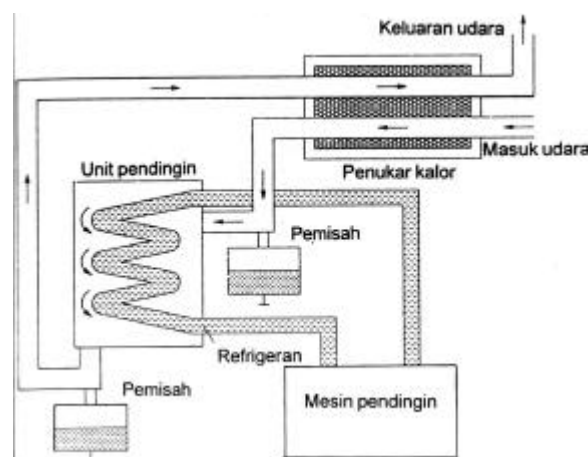
Gambar 2.16. Tangki Udara

c. Pengering udara

Air menyebabkan *seal* keras, korosi dan lubrikasi asli silinder hilang. Oleh karena itu diperlukan unit penyaring udara yang mengurangi kandungan embun sampai ke tingkat yang sesuai untuk digunakan pada elemen-elemen pemakai. Tiga cara untuk mengurangi kandungan air dalam udara yaitu:

✍ Pengering temperatur rendah

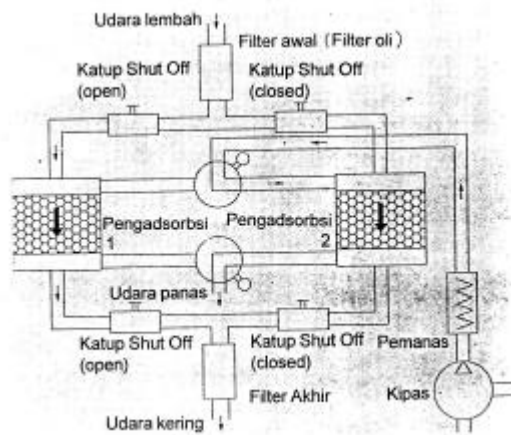
Unit ini beroperasi dengan cara udara bertekanan masuk melalui sistem penukar panas lalu mengalir terus melalui unit pendingin. Tujuannya adalah menurunkan temperatur udara sampai ke titik cair dan air kondensasi akan jatuh dalam jumlah yang diinginkan.



Gambar 2.17. Pengering Temperatur Rendah

✍ Pengering adsorpsi

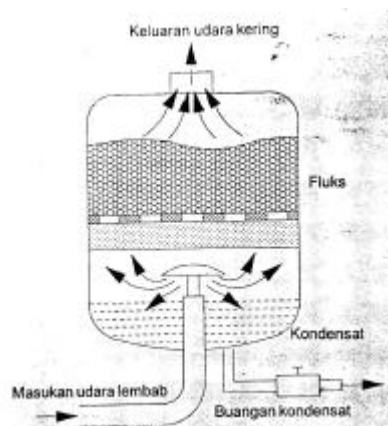
Dalam proses ini, udara bertekanan dialirkan melalui gel dan air diserap pada permukaan. Elemen pengering adalah butiran silikon dioksida.



Gambar 2.18. Pengering Adsorpsi

✍ Pengering absorpsi

Pengering absorpsi adalah proses kimia murni. Embun di dalam udara bertekanan bersenyawa dengan elemen pengering di dalam tangki.



Gambar 2.19. Pengering Absorpsi

d. Unit pemeliharaan

Rangkaian unit ini sering disebut dengan *Air Service Unit* (ASU) atau *Filter Regulator Lubricator* (FRL). Tiga komponen penyusun utama beserta fungsinya yaitu:

✍ Penyaring udara (*Filter*)

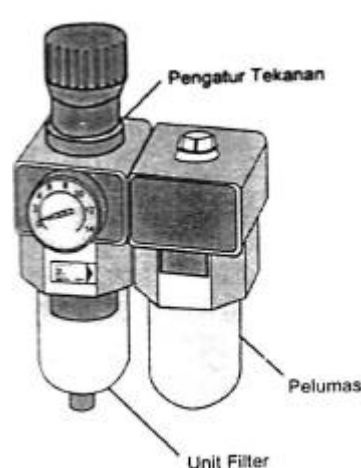
Fungsi dari *filter* ini adalah untuk menghilangkan semua partikel udara yang tidak diharapkan dalam saluran distribusi dan aktuator. Kapasitas filtrasi tergantung dari elemen yang digunakan (25 ? -5 ?)

✍ Pressure regulator

Udara yang disuplai dari kompresor terkadang mempunyai tekanan yang bervariasi sedangkan perlengkapan pneumatik bekerja pada tekanan yang tertentu dan konstan. Fungsi dari *pressure regulator* yaitu mengurangi tekanan suplai sampai ke tekanan yang diinginkan kemudian menjaga agar tekanan kerja tetap konstan.

✍ Pelumas (*Lubricator*)

Kecepatan siklus silinder, panjang langkah, dan banyaknya jumlah siklus menyebabkan lapisan film pelumas pada dinding silinder berkurang dan apabila hal tersebut terjadi maka keausan dan korosi akan dapat mudah terjadi sehingga umur dari pneumatik akan lebih singkat. *Lubricator* mensuplai kebutuhan pelumasan dalam bentuk kabut pelumas dalam udara saat periode kerja.



Gambar 2.20. Unit Pemeliharaan

2.5.2. Aktuator

Aktuator adalah bagian keluaran untuk mengubah energi suplai menjadi energi kerja yang dimanfaatkan. Aktuator pneumatik dapat dikelompokkan menjadi:

a. Gerak linier

✍ Silinder kerja tunggal

✍ Silinder kerja ganda

b. Gerak putar

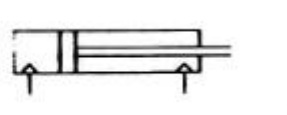
✍ Motor udara

✍ aktuator yang berputar (ayun)

Silinder kerja tunggal digerakkan oleh udara bertekanan pada satu arah dan pegas internal untuk arah sebaliknya dan hanya dapat melakukan kerja untuk arah yang digerakkan udara bertekanan. Sedangkan untuk silinder kerja ganda digerakkan oleh udara bertekanan pada kedua arah dan dapat melakukan kerja di kedua arah tersebut.



Simbol silinder kerja tunggal



Simbol silinder kerja ganda

Gaya teoritis dari silinder ditentukan dengan rumus:

$$F_{th} = p \cdot A$$

di mana,

F_{th} = gaya piston teoritis (N)

p = tekanan (Pa)

A = luasan piston (m²)

Lampiran 6 menunjukkan nilai gaya teoritis untuk beberapa macam diameter piston untuk arah tekan F_D dan arah tarik F_Z . Gaya friksi internal yang terjadi berkisar antara 5-20 %. Sehingga gaya aktual piston adalah:

$$\text{Arah tekan} \quad F = F_D \cdot p \cdot \eta \cdot ?$$

$$\text{Arah tarik} \quad F = F_Z \cdot p \cdot \eta \cdot ?$$

di mana,

F_D = gaya teoritis arah tekan per bar (N/bar)

F_Z = gaya teoritis arah tarik per bar (N/bar)

p = tekanan kerja (bar)

η = friksi internal

2.5.3. Katup Kontrol (*Control Valve*)

Fungsi utama dari katup adalah untuk merubah, membangkitkan atau membatalkan sinyal untuk tujuan penyensoran, pemrosesan, dan pengontrolan. Katup juga dipakai untuk menyuplai udara bertekanan ke aktuator. Katup kontrol arah mengontrol sinyal udara yang lewat dengan cara membangkitkan, mengubah, atau mengalihkan sinyal

Konstruksi dari katup kontrol arah ada 2 macam yaitu jenis popet dan jenis geser. Jenis popet untuk laju aliran yang rendah dan biasanya digunakan sebagai sinyal masukan dan sinyal pengolah. Sedangkan jenis katup geser mampu memberikan aliran yang lebih besar, sehingga memungkinkan katup ini berfungsi sebagai pengontrol daya dan aktuator. Katup dinyatakan dari:

- ✍ Jumlah saluran atau bukaan: 2,3,4,5 saluran, dst
- ✍ Jumlah posisi kerja: 2,3 posisi,dst
- ✍ Cara mengaktifkan katup: manual, pilot udara, solenoid,dst
- ✍ Cara pengembalian posisi kerja: pegas, udara, dst

Katup juga diberikan penomoran sesuai dengan fungsinya, yaitu:

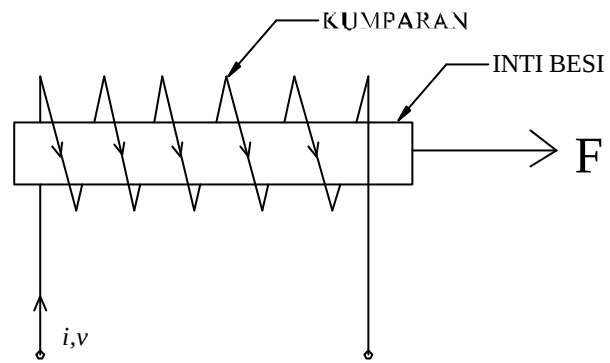
Nomor	Lubang
1	Lubang suplai
2, 4, 6	Lubang saluran
3, 5, 7	Lubang keluaran
10, 12, 14	Lubang pilot



Gambar 2.21. Penomoran Lubang Katup

Macam-macam katop kontrol dan simbolnya terdapat pada lampiran 3.

Katup Solenoid (*Solenoid valve*) bekerja dengan bantuan arus listrik, menggunakan prinsip kerja medan magnet karena adanya kumparan listrik. Apabila kumparan kawat dialiri arus listrik maka pada kumparan timbul medan magnet yang arahnya tegak lurus dengan arah arus. Inti besi yang terdapat di dalam kumparan mendapat gaya tolak dari medan magnet sehingga bergerak keluar. Gerakan ini digunakan untuk mengaktuasi katup pneumatik.



Gambar 2.22. Solenoid