

BAB II DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Junaidi dkk, (2011) merekayasa alat kempa panas (*hot press*) dengan sistem penekan dongkrak hidrolik untuk membuat papan komposit. Secara teoritis alat kempa panas yang dibuat memiliki kapasitas 12 lembar papan per jam dengan temperatur *heater* mencapai 200°C, menggunakan bahan serat TKS. Memanfaatkan dua buah dongkrak hidrolik dengan beban masing-masing 50 ton mampu menghasilkan tekanan maksimum 30 kg/cm², hasil akhirnya tekanan yang diberikan pada bahan serat TKS setebal 20 cm hanya mampu mencapai ketebalan 1,8cm.

Shamsuri, (2015) membuat produk *biocomposite* menggunakan teknik *compression molding*. Biokomposit yang dibuat mengkombinasikan antara polimer alam atau buatan sebagai matrik dan serat alam sebagai *filler*. Menurut penelitiannya teknik *compression molding* merupakan teknik yang paling tepat untuk manufaktur produk biokomposit dengan ukuran mold produk yang besar, selain itu teknik *compression molding* menghasilkan limbah yang lebih sedikit dibanding dengan teknik lain seperti *injection molding* dan *solution casting*.

Saputro dan Sakti, (2013) melakukan analisa dari hasil pengujian mesin cetak *hot press* pneumatik guna menggantikan mesin cetak secara manual yang kualitas produknya kurang bagus. Sebelum analisa dilakukan terlebih dahulu dengan membuat mesin cetak tersebut, kemudian diuji pada variabel parameter tekanan (2 bar, 3 bar, dan 4 bar), temperature (140°C, 150°C, dan 160°C), waktu (1 detik, 2 detik, dan 3 detik), dan jumlah benda uji 27 buah.

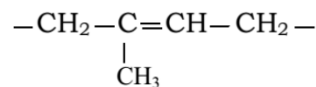
Ma dkk (2014) melakukan study terhadap desain *rubber seal* dari sebuah *swellpacker* pada sumur minyak *cementing*. Analisa yang dilakukan yaitu untuk mengetahui tekanan kontak dan tegangan terdistribusi dari *downhole swellpacker*, dan pengoptimalan untuk berbagai formasi struktur karet sumur minyak tersebut.

2.2 Rubber

Rubber atau karet adalah material elastis dengan bentuk rantai karbon yang disebut polimer. Penggabungan antara elastis dan polimer disebut elastomer atau yang umumnya disebut *rubber*. (Mark dkk, 2005). Klasifikasi rubber dibedakan menjadi dua kelompok yaitu:

2.2.1 Natural rubber

Karet alam merupakan jenis karet hasil dari penyadapan batang pohon *Hevea brasiliensis* yang memiliki ikatan kimia *poly isoprene* (C₅H₈) dengan kelebihan daya elastis sempurna, plastisitas yang baik, daya aus tinggi, *low heat build up*, dan *cracking resistance* yang baik.



Gambar 2.1 Rantai karbon karet alam
(Sumber: Mark dkk, 2005)

Hasil dari penyadapan pohon karet berupa lateks. Teknologi karet yang modern, lateks alam akan diproses pada tahap produk lanjutan dengan penambahan kompon untuk memperbaiki atau menambah sifat karakteristiknya, seperti menambahkan *thickning agent*, vulkanisasi agen, *fillers*, *dispersing agents*, dan *emulsifying agent*. (Mark dkk, 2005)

2.2.2 Karet sintetis

Karet sintetis merupakan teknik merekayasa untuk memperoleh sebuah senyawa kimia menyerupai sifat elastis karet. Karet sintetis memiliki variasi produk yang sangat beragam seperti *styrene butadine rubber*, *nitrile rubber*, *chloroprene rubber*, *ethylen-propylene rubber*, *butyl rubber*, *fluorocarbon rubber* dan lain-lain.

Karet sintetis yang melalui proses rekayasa kimia akan memiliki sifat yang lebih tahan dan unggul ketika diaplikasikan pada kondisi yang berhubungan dengan kimia. Kegunaan dari karet sintetis juga sangat beragam seperti pencampur cat, anti abrasi, bahan baku ban, industri otomotif, industri pesawat terbang, dan lain-lain.

Tabel 2.1 Penggunaan *rubber* (Niyogi, 2007)

Name	Type of Rubber	Tires	Treads	Plastic Modifications
eSBR	Styrene-Butadiene in emulsion	X	X	-
sSBR	Styrene-Butadiene in solution	X	X	-
BR	Polybutadiene	X	X	X
NBR	Nitryl	-	-	X
EPDM	Ethylene-propylene	X	-	X
IIR	Butyl	X	-	-
CR	Polychloroprene	-	-	-
TR	Plastics	-	-	X
Látex	Various types of latex	-	X	-

2.2.3.1 *Acrylonitril-butadine rubber* (NBR)

NBR sangat umum digunakan pada industri dan otomotif. Cara memproduksi karet NBR yaitu polimerisasi emulsi, terdiri dari kopolimer butadin dan akrilonitril. Jenis dari NBR dibedakan terhadap kandungan akrilonitril (25-50%) dalam senyawa tersebut, gugus akrilonitril (AcN) menyebabkan karet berketub serta tahan terhadap bahan yang tidak berketub seperti minyak bumi, bahan bakar, dan *chemical resistance*. Peningkatan jumlah akrilonitril dalam senyawa NBR akan meningkatkan *swelling resistance*, kekerasan, dan kekuatan tarik, tetapi memberikan efek buruk pada resilience, sifat-sifat elastis ketika suhu rendah.

Penelitian karakterisasi suhu vulkanisasi yang dilakukan pada karet NBR dengan kandungan akrilonitril sebesar 26%, 28%, dan 33% menunjukkan bahwa suhu pematangan 150°C akan meningkatkan kualitas pematangan dan sifat mekanis yang lebih baik pada karet NBR dengan kandungan akrilonitril yang rendah, hasil sebaliknya dengan suhu pematangan 170°C akan meningkatkan sifat mekanis dan kualitas pematangan pada NBR dengan kandungan akrilonitril yang besar. (Kinasih dkk, 2015).

Karakteristi pada berbagai kompon karet dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Rubber compound characteristic (Sumber: Clifton rubber)

	NATURAL RUBBER	SDR	CRDM	NEOPRENE CR	HYPALON* CSM	NITRILIC NDR	ACRYLIC ACIM	VAMAC*	SANTOPRENEI	SILICONC SI	TERBAM-HNBR	VITON* FPM	FLUORO-SILICONE Fsi
COST FACTOR	1	1	1	2	3	2	4	4	4	6	8	15	40
HARDNESS RANGE	30-95*	40-95*	30-95*	30-90*	40-85*	40-100*	50-95*	45-90*	50-100*	40-80*	50-95*	50-95*	40-90*
COLOURS	Full Range	Full Range	Limited Range	Full Range	Limited Range	Limited Range	Black	Limited Range	Full Range	Limited Range	Limited Range	Limited Range	Limited Range
HEAT RESISTANCE (°C)													
Maximum Continuous	76°C	85°C	130°C	99°C	130°C	100°C	150°C	150°C	110°C	205°C	125°C	205°C	180°C
Maximum Intermittent	105°C	115°C	150°C	125°C	160°C	130°C	180°C	180°C	115°C	300°C	150°C	300°C	200°C
LOW TEMPERATURE RESISTANCE													
	-60°C	-55°C	-50°C	-40°C	-25°C	-20°C	-20°C	-40°C	-40°C	-60°C (special grades - 80°C)	-30°C	-20°C	-60°C
RESISTANCES													
Oxidation	Fair	Fair	Excellent	Very Good	Excellent	Good	Excellent	Excellent	Good	Excellent	Excellent	Outstanding	Excellent
Ozone & Weathering	Poor	Poor	Outstanding	Very Good	Outstanding	Fair	Excellent	Excellent	Good	Outstanding	Very Good	Outstanding	Outstanding
OIL RESISTANCE													
*ASTME Oil No. 1 @ 20°C	Poor	Poor	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	100°C Excellent	100°C Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
@ 100°C	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Good	Good	Good	150°C Good	125°C Excellent	Fair	Good	Excellent	Excellent	Excellent
*ASTME Oil No. 3 @ 20°C	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Good	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Fair	Good	Fair	Excellent	Excellent
@ 100°C	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Fair	Fair	Good	100°C Good	100°C Fair	Fair	Fair	Fair	150°C Excellent	150°C Excellent
FUEL RESISTANCE													
*ASTME Fuel B @ 40°C	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Poor	Poor	Fair	Poor	Unsuitable	Poor	Unsuitable	-	Excellent	Fair (good at low temp)
SOLVENT RESISTANCE (20°C)													
Alcohol	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Fair	Good	Good	Excellent	Good	Good
Acetone	Fair	Fair	Good	Fair	Fair	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Fair	Unsatisfactory	Fair	Good	Unsatisfactory	Unsatisfactory
Benzene	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Unsatisfactory	Fair	Good	Good
CHEMICAL RESISTANCE													
Acids	Fair	Fair	Good	Good	Very Good	Good	Poor	Fair	Good	Fair	Good	Excellent	Good
Bases	Good	Good	Fair	Fair	Good	Fair	Poor	Good	Very Good	Fair	Good	Good	Fair
PHYSICAL STRENGTH													
COMPRESSION SET													
	Good	Good	Fair to Good	Fair to Good	Fair	Good	Good	Fair	Fair	Good	Good	Good	Good
TEAR & ABRASION RESISTANCE													
	Excellent	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Poor	Very Good	Good	Poor
PERMEABILITY TO GASES													
	Excellent	Good	Very Good	Very Good	Fair	Good	Poor	Fair	Good	Good	Fair	Fair	Fair
ELECTRICAL STRENGTH													
	Poor	Fairly Low	Low	Low	Low	Low	Low	Very Low	Fairly Low	Fairly Low	Good	Very Low	Fairly Low
FLAME RESISTANCE													
	Excellent	Excellent	Good	Good	Good	Poor	Fair	Good	Excellent	Excellent	Poor	Good	Excellent
WATER RESISTANCE													
	Poor	Poor	Self-Extinguishing	Self-Extinguishing	Good	Poor	Poor	Fair	Refundant Grades Available	Good	Poor	Self-Extinguishing	Self-Extinguishing
	Very Good	Good	Good	Good	Very Good	Good	Poor	Good	Good	Good	Very Good	Good	Good

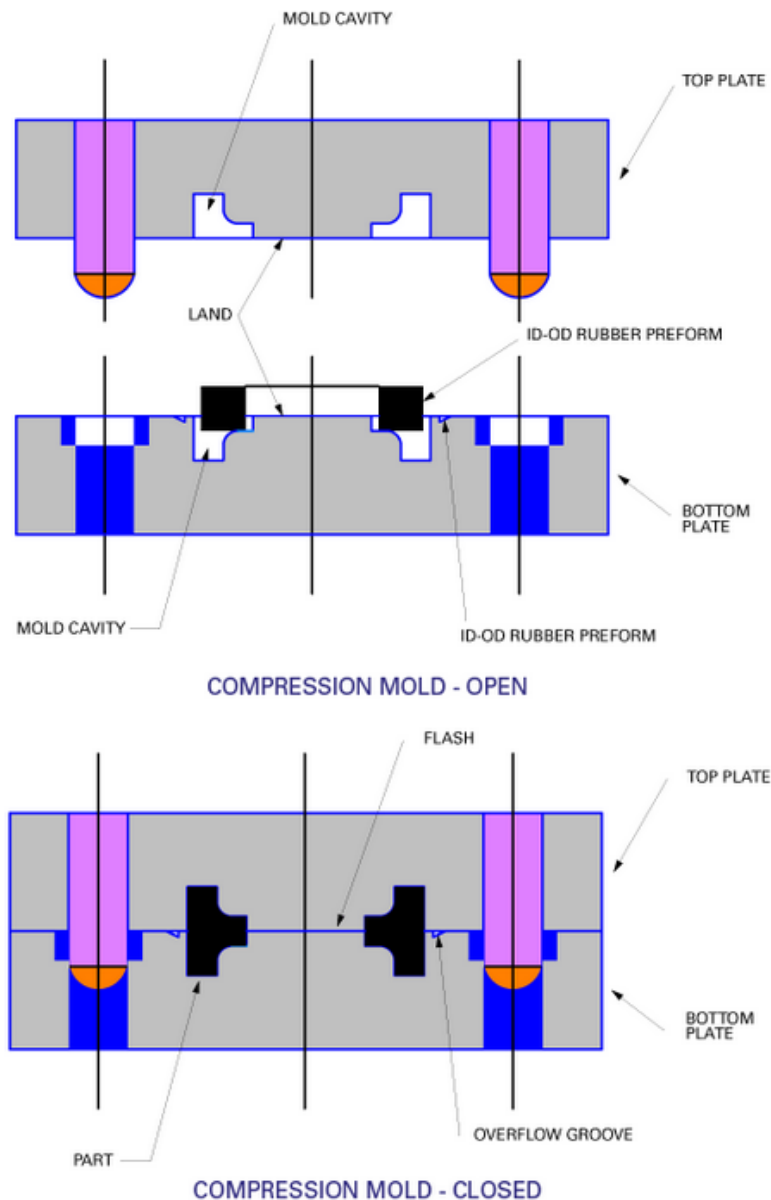
The aromatic content of oil has a moderate swelling effect on rubber. ASTM Oil No. 1 (Flash point 243°C, Aniline point 124°C) has a swelling effect. ASTM Oil No. 3 (Flash point 163°C, Aniline point 70°C) has a severe swelling effect. Both oils are petroleum based and are fully described in ASTM D471.

*Hayer Registered Trademark
 Ⓜ Monsanto Registered Trademark
 Ⓞ Du Pont Registered Trademark

2.3 *Rubber Molding*

Rubber atau karet banyak diproduksi menggunakan teknik *molding*, sebuah proses *molding* yang melibatkan pembentukan atau vulkanisasi *rubber* kadang-kadang membutuhkan tambahan material yang berbeda seperti tekstile, plastik, atau metal. Ada tiga teknik *molding* secara umum yang digunakan untuk memproduksi produk *rubber* yaitu *compression*, *transfer*, dan *injection molding*. Secara umum *compression molding* merupakan proses produksi yang pertama dan paling umum ketika dihubungkan dengan produksi *rubber molding*. Metode *compression molding* juga lebih ideal untuk skala *home industry* yang notabene memiliki volume produksi yang rendah sampai menengah.

Kegunaan *compression molding* untuk proses produksi *rubber* diantaranya dapat menghasilkan produk berupa *gaskets*, *seals*, dan *O-ring*. Proses *compression molding* untuk material *rubber* atau *raw material* campuran tidak jauh berbeda dengan material komposit maupun plastik. Material *rubber* sebelum dibentuk biasanya berupa lembaran karet mentah yang akan diletakan pada rongga cetakan tertutup dengan bentuk sebuah produk, peletakan material tersebut secara manual oleh operator kedalam *mold*, kemudian *mold* ditutup, dengan memberikan tekanan dan panas seperti pada proses *vulcanisize* sehingga terjadi reaksi sambung silang antar molekul-molekul karet (Kinasih dkk, 2015). Material *rubber* akan mengikuti bentuk *cavity* dan terakhir akan terbentuk sesuai dengan cetakan, seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Compression mold* pembentukan *rubber* sebelum dan setelah *mold* ditutup. (Sumber: www.timcorubber.com)

2.3.1 Vulkanisasi *rubber*

Vulkanisasi merupakan teknologi untuk menghasilkan sebuah produk karet dengan berbagai keunggulan dari sifat karet pada umumnya yang belum melewati proses vulkanisasi. Produk karet dapat ditingkatkan kualitas dan mutunya salah satunya dengan proses vulkanisasi. Vulkanisasi juga dapat diartikan sebagai proses perubahan sifat karet menjadi thermoset dari termoplastik untuk

meningkatkan sifat elastis, struktur molekul karet membentuk jaringan tiga dimensi yang disebut ikatan silang. (Hofmann, 1967)

Vulkanisasi untuk produk barang jadi karet biasanya menggunakan sistem vulkanisasi belerang. Terdapat tiga sistem vulkanisasi belerang yaitu sistem konvensional (CV), sistem efisien (EV), dan sistem semi efisien (SEV) ketiganya dibedakan oleh perbandingan konsentrasi belerang dengan pencepat (Long, 1985). Selain sistem vulkanisasi belerang, suhu yang digunakan pada proses vulkanisasi turut berperan penting dalam menentukan sifat mekanis dan dinamis vulkanis karet. Suhu yang tinggi akan mempercepat proses vulkanisasi sehingga mampu mengurangi biaya produksi akan tetapi menghasilkan produk dengan kualitas yang kurang baik akibat tidak terkontrolnya reaksi samping. Sedangkan suhu rendah menghasilkan kualitas dan penamakan produk karet alam maupun sintetis yang lebih baik dibanding suhu tinggi. akan tetapi, membutuhkan waktu proses vulkanisasi yang lebih lama, sehingga meningkatkan biaya produksi (Zhang *et al*, 2015).

Karet sintetis jenis NBR (*akrilonitril-butadine rubber*) dengan kandungan akrilonitril 34% peningkatan suhu vulkanisasi meningkatkan pampat tetap, ketahanan abrasi, *crack* dan modulus, dan ketahanan sobek (Palaty dan Joseph, 2006). Sedangkan NBR dengan kandungan akrilonitril 33% divulkanisasi dengan suhu (60-150°C) dengan variasi pengaktifan dan pencepat berbeda menunjukkan bahwa kuat tarik, ketahanan sobek, dan jumlah ikatan silang menurun (Bhomick dan De, 1979). Sedangkan perpanjangan putus, abrasi, dan pampat tetap meningkat seiring kenaikan suhu vulkanisasi. Pada karet alam (NR) divulkanisasi dengan sistem CV, SEV, dan EV dengan meningkatkan suhu dari 150-180°C menunjukkan mampu mempercepat waktu pemasakan optimum dan reversi, menurunkan kuat tarik, kekerasan, modulus, ketahanan sobek, pampat tetap, dan sifat dinamisnya (Mukhopadaya *et al.*, 1977). Akan tetapi pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang *et al.* (2015) karet alam yang divulkanisasi dengan suhu tinggi (150-180°C) menggunakan sistem SEV menunjukkan peningkatan pada sifat pampat tetap, perpanjangan putus, dan *heat buildup*, namun terjadi penurunan kuat tarik, kekerasan, modulus dan *resilience*. Jadi pemilihan sistem dan suhu

vulkanisasi menentukan karakteristik dari jenis karet alam dan sintetis guna memenuhi standar mutu produk-produk *rubber* yang spesifik.

2.3.2 Masalah pada *Rubber Mold*

Pada setiap proses produksi tidak akan terlepas dari berbagai permasalahan. Ada beberapa masalah yang sering muncul saat proses produksi pembentukan *rubber* diantaranya sbb:

1. *Shrinkage* (Penyusutan)

Pada saat pendinginan, baik rongga cetakan dan bagian part yang dibentuk, biasanya terdapat selisih atau susut. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan nilai koefisien termal antara *rubber* dan *mold* yang terbuat dari metal. *Shrinkage* biasanya didefinisikan sebagai perbedaan antara dimensi rongga cetakan dengan produk dari hasil cetakan tersebut, ketika keduanya ditempatkan pada temperature ruang yang sama. Hal ini secara sederhana dapat diartikan sebagai perbedaan temperature antara cetakan yang lebih panas dibandingkan dengan produk *rubber*.

Jumlah dari penyusutan dapat diatasi dengan memperhatikan faktor tekanan, temperature, dan waktu pembentukan dari jenis kompon yang digunakan. Sehingga jumlah dari penyusutan dapat diperkirakan dan *mold* didesain dengan toleransi ukuran yang diperbesar yang sebanding dengan jumlah dari penyusutan itu sendiri. (Cielinski, 2013)

Tabel 2.3 Data *shrinkage* untuk kompon karet (Sumber: applerubber.com)

		SHRINKAGE DATA				
		Part Size (in)				
Material	Cavity	Heat 1	Heat 2	Heat 3	Average (in/in)	Calculated Shrink (in/in)
Nitrile	Small	0.9879	0.9883	0.9881	0.9881	0.0240
	Medium	1.7156	1.7160	1.7183	1.7166	0.0248
	Large	2.4466	2.4479	2.4502	2.4482	0.0250
Ethylene-Propylene	Small	0.9834	0.9849	0.9843	0.9842	0.0278
	Medium	1.7098	1.7062	1.7081	1.7080	0.0297
	Large	2.4345	2.4360	2.4395	2.4366	0.0296
FKM Before Post-Cure	Small	0.9885	0.9882	0.9888	0.9885	0.0235
	Medium	1.7188	1.7187	1.7191	1.7188	0.0235
	Large	2.4535	2.4512	2.4536	2.4527	0.0232
FKM With 16 hr 480 F PC	Small	0.9805	0.9793	0.9801	0.9799	0.0320
	Medium	1.7073	1.7064	1.7058	1.7065	0.0305
	Large	2.4333	2.4381	2.4335	2.4349	0.0303
FVMQ Before Post-Cure	Small	0.9864	0.9882	0.9887	0.9877	0.0243
	Medium	1.7129	1.7165	1.7174	1.7156	0.0253
	Large	2.4478	2.4411	2.4470	2.4453	0.0261
FVMQ With 4 hr 400F PC	Small	0.9786	0.9789	0.9804	0.9793	0.0326
	Medium	1.7030	1.7045	1.6983	1.7019	0.0331
	Large	2.4289	2.4202	2.4271	2.4253	0.0341
Cavity					Size (in)	
"Small"					1.0123	
"Medium"					1.7602	
"Large"					2.5109	

2. *Backrinding*

Backrinding merupakan istilah yang digunakan untuk menunjukkan sebuah tampilan robek atau cungkulan pada perpisahan sebuah cetakan. Fenomena ini disebabkan oleh ekspansi termal dari *rubber* setelah *cross-linking*, yang mana dapat memaksa material karet silang kedalam *parting line*.

3. *Orange Peeling*

Hal ini biasanya disebabkan oleh permukaan karet yang kontak langsung dengan permukaan cetakan yang panas. Permukaan karet yang kontak langsung akan mengalami *cross-linking* sebelum karet memenuhi cetakan.

4. *Porosity*

Hal ini disebabkan oleh kehadiran zat-zat yang tidak diinginkan pada kompon yang digunakan, terutama air.

5. *Blisters*

Udara yang terjebak saat proses mold merupakan penyebabnya.

2.3.3 Desain *rubber mold*

Masalah yang muncul pada *compression molding* disebabkan oleh beberapa faktor seperti yang telah dijelaskan diatas, untuk meminimalisir hal tersebut salah satunya dapat diatasi dengan mendesain *mold* sesuai dengan kebutuhan dan ketentuan yang ada. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam mendesain *mold* diantaranya sbb:

1. Material Mold

Pemilihan material yang digunakan sebagai *mold* merupakan hal yang paling utama karena pemilihan *mold* yang salah dapat memberikan kerugian yang cukup signifikan. Pada umumnya material *mold* dapat menggunakan baja S45C atau S50C, akan tetapi dapat juga dibuat menggunakan baja dengan kualitas lebih baik.

2. Faktor *Shrinkage*

Dalam mendesain sebuah *mold* untuk produk berbahan karet perlu memperhatikan jumlah penyusutan material karet setelah melalui proses pendinginan, ada baiknya dalam pembuatan maupun desain *mold* dibuatkan master mold terlebih dahulu dari material *mold* yang lebih murah seperti kayu atau plastik. Sehingga kerugian material maupun waktu akibat kesalahan dalam pembuatan cetakan dapat diminimalkan sekecil mungkin.

3. *Cut Flow*

Dalam mendesain *cut flow* akan menentukan proses finishing dari *over flow* material karet.

4. *Parting Line*

Parting line akan menentukan mudah dan tidaknya produk diambil dari cetakan, jika salah dalam mendesain *parting line* maka produk akan sulit diambil dari cetakan dan akan menyebabkan *rejection rate* yang tinggi.

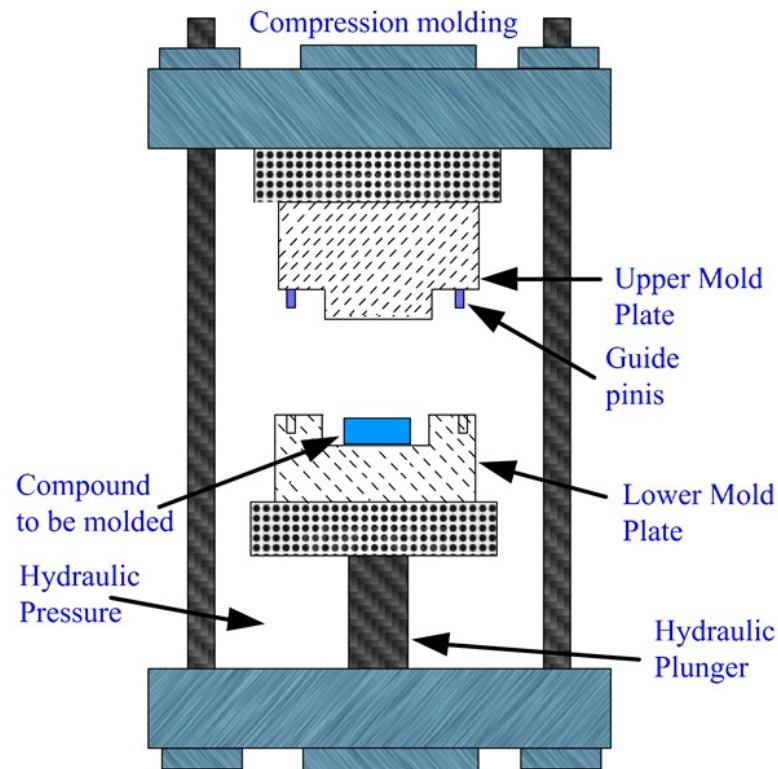
5. *Air Trap*

Desain *mold* menentukan produk terhindar dari *air trap* atau tidak. *Air trap* akan menyebabkan *blister* pada hasil produk.

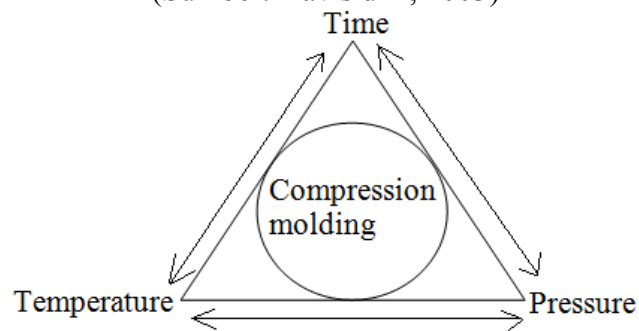
2.4 *Compression Molding*

Compression molding (thermoforming) atau yang lebih dikenal sebagai teknik untuk membuat produk komposit yang bervariasi, (Shamsuri dan Daik, 2012) teknik tersebut merupakan metode dengan molding yang tertutup. Sedangkan proses kerjanya dengan menerapkan tekanan tinggi ke bagian cetakan. Metode molding kompresi dapat dilihat pada gambar 2.3, perpaduan antara dua buah cetakan yang terbuat dari metal digunakan untuk fabrikasi berupa produk komposit. Mesin *compression molding* secara umum memiliki plat dasar dibagian bawah yang dipasang statis atau tetap sementara bagian plat yang berada diatas difungsikan agar dapat bergerak naik dan turun untuk menyesuaikan tekanan yang dibutuhkan. Material penyusun komposit *reinforcement* dan matrik diletakan di cetakan metalik sebelum proses kompresi.

Selain produk komposit, *compression molding* dapat digunakan untuk mencetak material plastik (*compound plastic*). Pengerjaan kompresi *molding* pada material plastik tidak jauh berbeda dengan produk komposit, pada proses kompresi dengan produk berbahan plastik pengerjaanya lebih mudah yaitu dengan meletakkan material plastik tersebut kedalam mold yang akan dipanaskan. Material plastik yang dipanaskan di dalam *mold* akan melunak sehingga ketika diberi tekanan dan panas yang berlanjut pada mold tersebut, maka menghasilkan reaksi kimia yang bisa mengeraskan material *thermosetting* tersebut pada periode waktu tertentu. Kemudian material tersebut akan menyesuaikan diri di dalam rongga cetakan atau yang disebut *cavity* yang didesain dengan bentuk sebuah produk dengan akurasi dan presisi yang tinggi. Setelah serangkaian proses kompresi molding produk dari mold dapat dipindahkan. (Davis dkk, 2003).



Gambar 2.3 Metode *compression molding*
(Sumber: Davis dkk, 2003)



Gambar 2.4 Parameter kritis dari metode *compression molding*
(Sumber: Davis dkk, 2003)

Pada prinsipnya, sebuah mesin *compression molding* merupakan jenis pencetakan dengan tekanan yang orientasinya bekerja secara vertikal terhadap dua bagian cetakan (bagian atas dan bawah). Secara umum, mekanisme hidrolik digunakan pada saat mengaplikasikan tekanan pada mesin *compression molding*. Parameter kontrol sangat dibutuhkan pada metode *compression molding* untuk memperoleh hasil akhir dari sebuah produk yang memiliki sifat-sifat propertis unggul, parameter tersebut dapat dilihat pada gambar 2.4 tiga parameter tersebut

(*pressure*, *temperature*, dan waktu) merupakan bagian yang sangat penting karena tiap-tiap dari parameter tersebut memberikan dampak yang signifikan terhadap hasil akhir sebuah produk (Davis dkk, 2003). Dampak dari tiap-tiap parameter jika tidak sesuai adalah sebagai berikut:

1. *Pressure*

Jika pada saat pemberian tekanan tidak mencapai batas ketentuan, akan berdampak buruk terhadap adesi permukaan dari fiber dan matrik itu sendiri. Sedangkan jika tekanan yang diberikan terlalu tinggi, hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada material yang digunakan.

2. *Temperature*

Temperatur yang berlebih saat proses kompresi, akan memberikan perubahan pada sifat properties material yang digunakan termasuk penyusun material sebuah komposit (*fiber* dan *matrix*). Sedangkan jika *temperature* terlalu rendah dari pada sifat properties materialnya, maka fiber dari penyusun sebuah komposit tidak melakukan ikatan silang secara sempurna.

3. Waktu

Waktu disesuaikan terhadap parameter *pressure* dan *temperature*, ketidaksesuaian faktor waktu berperan terhadap faktor yang menyebabkan temperatur dan *pressure* (terlalu tinggi atau rendah).

Selain faktor parameter kontrol, faktor manufaktur juga berperan penting terhadap hasil akhir proses produksi *compression molding* seperti dinding permukaan pemanas cetakan, kesesuaian penutup antara dua plat *modal*, dan waktu *de-molding*. Raw material yang umum digunakan pada fabrikasi *composite* menggunakan proses *compression molding* dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Penggunaan raw material pada proses *compression molding*

Penggunaan Material	
Matrix	<p>Matrix Thermosetting: <i>Epoxy, polyester, polyvinyl ester, phenolic resin, Unsaturated polyester, polyurethane resin, Urea formaldehyde.</i></p> <p>Thermoplastic: <i>Polypropylene (PP), polyethylene (PE), nylon, polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC), cellulose acetate, polyetherether ketone (PEEK), Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), polystyrene (PS) biodegradable polymers such as poly lactic acid (PLA), poly vinyl alcohol (PVA), soy based plastic, starch based polymers dll.</i></p>
Reinforcement	<p>Reinforcement <i>Glass fiber, carbon fiber, aramid fiber, natural plant fibers (sisal, banana, nettle, hemp, flax dll.)</i></p> <p><i>(all these fibers may be in the form of unidirectional mat, bidirectional (woven) mat, stitched into a fabric form, mat of randomly oriented fibers, short fibers, chopped fibers)</i></p>

2.4.1 Jenis Proses *Compression Molding*

Proses *compression molding* dapat dibedakan atas empat macam metode yaitu:

A. *Flash type Mold*

Jenis ini bentuknya sederhana dan murah, saat mold menutup maka material sisa yang kemudian meluap akan membentuk lapisan *parting line/plain (land B)*, dan karena lapisan tersebut tipis maka akan segera mengeras/beku sehingga menghindari meluapnya material lebih banyak. Jadi biasanya mold akan diisi material sepenuhnya sampai luapan yang terjadi sebanyak yang diijinkan.

B. *Positive Mold*

Jenis ini terdiri dari suatu rongga (*cavity*) yang dalam dengan sebuah *plunger* yang mengompresikan/memadatkan material kompond pada bagian bawah *mold*. Pemberian material disesuaikan dengan kapasitasnya biasanya

dilakukan dengan cara menimbang sesuai dengan perbandingan sehingga menghasilkan produk yang baik dan seragam.

C. *Landed Positive Mold*

Jenis ini tidak jauh berbeda dengan jenis *positive mold*, akan tetapi tinggi bidang batas dibatasi. Bagian “land” bekerja menahan tekanan (bukan bagian produknya). Karena ketebalan material terkontrol dengan baik, maka kepadatan benda kerja tergantung dari posisi pengisian yang diberikan.

2.4.2 Kelebihan dan Kekurangan *Compression Molding*

A. Kelebihan dari proses *compression molding*

1. Rata-rata produksi cukup tinggi.
2. Hasil akhirnya, permukaan yang baik dengan perbedaan tekstur dan model dapat diperoleh.
3. Keseragaman *part* dengan metode ini cukup tinggi hasilnya.
4. Fleksibel terhadap berbagai model produk *part*.
5. Memungkinkan penambahan pelengkap seperti *insert*, *bosses* pada *mold*.
6. Biaya perawatan murah.
7. Sisa tegangan tidak mempengaruhi atau dapat diabaikan pada komponen *mold*.

B. Kekurangan dari proses *compression molding*

1. Nilai investasi mesin dan komponen cukup tinggi
2. Proses ini dapat digunakan untuk produksi dengan jumlah banyak, sedangkan dengan jumlah produksi yang sedikit atau prototip akan merugikan dalam segi biaya.
3. Perlu pengamatan yang intensive saat proses produksi.
4. Terkadang memerlukan proses tambahan setelah proses kompresi selesai, seperti *trimming* dan *machining*.
5. Terbatas pada kedalaman *mold*.

2.5 Pneumatik

Dalam dunia industri banyak dijumpai sebuah mekanisme yang dapat memindahkan benda atau bahan dari satu lokasi ke lokasi lain. Proses pemindahan tersebut biasanya dimotori oleh suatu alat yang bekerja menggunakan fluida baik cair maupun gas yaitu yang disebut sebagai “hidrolik pneumatik”. Sistem berbasis fluida yang menggunakan cairan sebagai media disebut sistem hidrolik, sementara sistem yang basisnya menggunakan fluida gas sebagai media disebut sistem pneumatik.

Gerakan dari sistem hidrolik dan pneumatik merupakan kombinasi dengan berbagai sistem yang lain yang memungkinkan dapat mengoptimalkan sistem pemindahan tersebut.

2.5.1 Pengertian Pneumatik

Pneumatik dapat dijelaskan dari beberapa sudut pandang meliputi pengertian bahasa, ilmu pengetahuan dan dunia otomasi industri. Kata pneumatik berasal dari bahasa Yunani “pneuma” yang berarti napas atau udara, jadi pneumatik dapat didefinisikan sebagai sesuatu yang terisi udara atau yang digerakan oleh udara bertekanan.

Pneumatik dalam dunia industri memiliki peran sebagai teknik dalam menerapkan udara bertekanan sebagai proses mekanik dimana udara difungsikan untuk memindahkan suatu gaya atau gerakan. Jadi pneumatik meliputi semua komponen mesin atau peralatan yang terjadi proses pneumatik. Beberapa bidang aplikasi industri yang menggunakan media pneumatik dalam hal penanganan material adalah sbb (Crosser, 1989):

1. Pencekaman benda kerja
2. Penggeseran benda kerja
3. Pengaturan posisi benda kerja
4. Pengaturan arah benda kerja

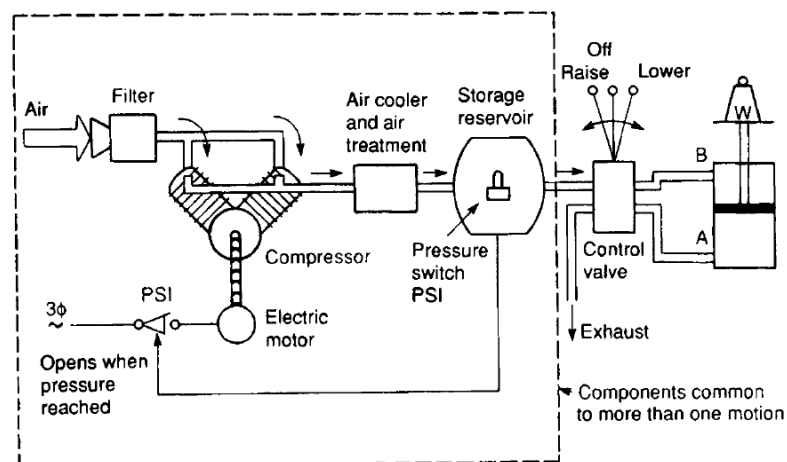
Secara umum penerapan pneumatik yaitu sbb:

1. Pengemasan (*packaging*)
2. Pemakanan (*feeding*)
3. Pengukuran (*metering*)

4. Pengaturan buka dan tutup (*door or chute control*)
5. Pemindahan material (*transfer of material*)
6. Pemutaran dan pembalikan benda kerja (*turning and inverting of parts*)
7. Pemilahan bahan (*sorting of parts*)
8. Penyusunan benda kerja (*stacking of component*)
9. Pencetakan benda kerja (*stamping and embosing of component*)

2.5.2 Sistem pneumatik

Menurut Parr (1991), Gambar 2.5 menunjukkan komponen yang umum digunakan pada sistem pneumatik “silinder kerja ganda”. Aktuator yang berbentuk silinder dengan gaya maksimum pada poros dapat ditentukan oleh tekanan udara dan luas permukaan area piston. Tekanan yang beroperasi pada sistem pneumatik umumnya lebih rendah daripada sistem hidrolik, pneumatik memiliki tipe kekuatan angkat dengan tekanan 10 bar yang mampu memindahkan 10 kg/cm^2 dari area piston, sehingga dapat diartikan untuk 16 cm silinder diameter piston mampu mengangkat berat sebesar 2000 kg beban pada batas aman. Perbandingan pneumatik dengan hidrolik yaitu untuk luas area piston yang sama, pada sistem hidrolik mampu mengangkat beban yang jauh lebih besar.



Gambar 2.5 Sistem pneumatik ideal
(Sumber: Parr, 2008)

Katup pelayanan udara akan mendistribusikan udara ke aktuator dengan prinsip yang sama dengan sistem pelayanan fluida hidrolik. Perbedaannya yaitu

pada pneumatik menggunakan udara bebas yang terdapat pada atmosfer. Udara yang terdapat pada atmosfer akan disaring melalui saluran penyaringan kemudian akan dikompresikan menggunakan bantuan kompresor (biasanya menggunakan motor AC). Udara yang terdapat pada atmosfer mengandung uap air sehingga memungkinkan terjadinya kondensasi yang akan merusak komponen yang ada pada sistem pneumatik, sehingga sistem pneumatik yang baik biasanya disertai dengan sistem pendingin dan unit perlakuan udara.

Udara bertekanan memiliki peran penting untuk mencukupi tekanan yang dibutuhkan oleh aktuator untuk menerima beban, dibutuhkan sebuah tangki reservoir untuk memastikan udara bertekanan yang disuplai oleh kompresor berada dalam tekanan konstan. Tanpa reservoir ini, tekanan yang akan menggerakkan silinder akan terhambat atau mengalami gangguan sehingga silinder tidak bekerja pada tekanan yang diinginkan.

2.5.3 Silinder Pneumatik

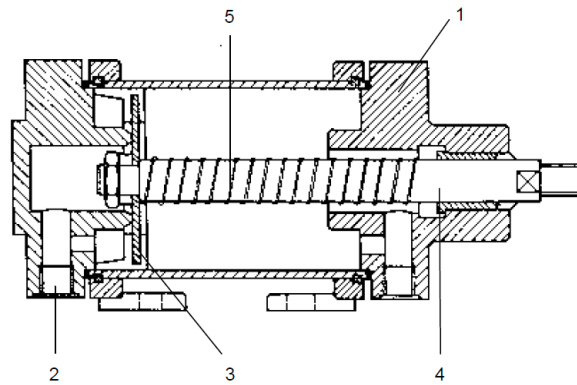
Sistem pneumatik memerlukan bagian keluaran yang dapat mengubah energi suplai berupa udara bertekanan menjadi energi kerja yang dimanfaatkan. Komponen yang memiliki peran tersebut yaitu aktuator, dimana aktuator menurkan sinyal kontrol melalui elemen kontrol terakhir. Aktuator pada pneumatik dibagi menjadi dua kelompok yaitu:

1. Gerak Linear
 - a) Silinder kerja tunggal (*single acting silinder*)
 - b) Silinder kerja ganda (*double acting silinder*)
2. Gerak Putar
 - a) Motor udara
 - b) Aktuator yang berputar (ayun)

A. Silinder Kerja Tunggal

Silinder kerja tunggal (*single acting silinder*) dapat dilihat pada gambar 2.6 memiliki konstruksi dengan seal piston tunggal yang dipasang pada sisi saluran masuk. Pada konstruksi silinder ini, pembuangan udara di sisi batang piston silinder dikeluarkan ke atmosfer melalui saluran pembuangan. Penggunaan filter pada saluran pembuangan agar udara kotor tidak masuk kedalam aktuator yang

dapat mengotori *seal* piston. *Seal* biasanya terbuat dari bahan yang fleksibel seperti logam atau plastik, tapi bisa juga menggunakan seal karet sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.6 Kontruksi silinder kerja tunggal
(Sumber: Parr, 2008)

1. Prinsip Kerja

Suplai udara bertekanan pada sisi saluran masuk, sisi yang lain terbuka ke atmosfer. Silinder pada aktuatar jenis sigle hanya mampu bekerja paa satu arah, gerakan piston untuk kembali biasanya diberikan oleh pegas yang ada di dalam silinder. Perancangan pegas direncanakan untuk membuat piston dapat kembali seperti pada posisi awal dengan kecepatan tinggi pada kondisi tanpa beban. Penempatan pegas yang berada di dalam silinder akan membatasi langkah silinder hanya maksimal sampai sekitar 80 mm.

Pada perancangan silinder kerja tunggal, penggunaan pegas untuk mengembalikan piston pada posisi awal dapat ditempatkan pada area diluar silinder pneumatik, sehingga langkah piston yang terbatas dapat diatur batasanya sesuai perencanaan.

2. Jenis silinder kerja tunggal

- a) Silinder membran (diafragma)
- b) Silinder membran dengan rol.

2.5.4 Karakteritik Silinder

Berdasarkan pandan dari *Basic Pneumatics* (1997) karakteristik silinder secara teori maupun dengan data-data yang diperoleh langsung dari pabriknya

dapat ditentukan. Metode ini merupakan metode yang digunakan untuk merancang sebuah aktuator pneumatik.

A. Gaya Piston

Gaya piston pada silinder pneumatik secara teoritis dihitung dengan rumus berikut:

$$F = A \cdot p$$

Silinder kerja tunggal maka:

$$F = \left(\frac{\pi}{4} \times D^2 \times p \right) - f$$

Silinder kerja ganda maka:

1. Langkah maju $F = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times p$

2. Langkah mundur $F = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot p$

Keterangan:

F = Gaya piston (N)

f = Gaya pegas (N)

D = Diameter piston (m)

d = Diameter batang piston (m)

A = Luas penampang piston (m²)

p = Tekanan kerja (Pa)

Gaya pada piston saat kembali biasanya lebih kecil dari pada saat maju, karena pada silinder kerja tunggal saat kembali digerakan oleh gaya dari pegas. Sedangkan pada silinder kerja ganda langkah kembali akan lebih kecil dari pada langkah maju akibat adanya piston rod yang mengurangi luas area penampang. Selain itu gesekan piston pada silinder berpengaruh sekitar 3-10% terhadap gaya piston. Berikut adalah gaya pada piston silinder dari berbagai ukuran dengan tekanan 1-10 bar:

Tabel 2.5 Gaya piston berbagai ukuran silinder (Sumber: SMC Pnematics, 1997)

Diame ter Piston (mm)	Tekanan Kerja (bar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Gaya Piston (kgf)									
6	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
25	4	9	13	17	21	24	30	34	38	42
35	8	17	26	35	43	52	61	70	78	86
40	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
50	17	35	53	71	88	106	124	142	159	176
70	34	69	104	139	173	208	243	278	312	346
100	70	141	212	283	353	424	495	566	636	706
140	138	277	416	555	693	832	971	1110	1248	1386
200	283	566	850	1133	1416	1700	1983	2266	2550	2832
250	433	866	1300	1733	2166	2600	3033	3466	3800	4332

B. Kebutuhan Udara

Suplai kebutuhan udara pada tekanan kerja, diameter piston dan langkah tertentu, konsumsi udara dihitung sbb:

1. Kebutuhan udara = perbandingan kompresi x luaspenampang piston x panjang langkah
2. $Perbandingan\ kompresi = \frac{1,031+tekanan\ kerja\ (bar)}{1,031}$

Guna mempermudah dan mempercepat dalam menentukan kebutuhan udara, tabel dibawah ini menunjukan kebutuhan udara persentimeter langkah piston untuk berbagai macam tekanan dan diameter piston silinder.

Tabel 2.6 Kebutuhan udara silinder persentimeter langkah dengan fungsi tekanan kerja dan diameter piston. (Sumber: SMC Pneumatics, 1997).

Diameter Piston (mm)	Tekanan Kerja (bar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Kebutuhan udara (q) dalam liter/cm langkah									
6	0,0005	0,0008	0,0011	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025	0,0027	0,0030
12	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012
16	0,004	0,006	0,008	0,010	0,011	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022
25	0,010	0,014	0,019	0,024	0,029	0,033	0,038	0,043	0,048	0,052
35	0,019	0,028	0,038	0,047	0,056	0,066	0,075	0,084	0,093	0,103
40	0,025	0,037	0,049	0,061	0,073	0,085	0,097	0,110	0,122	0,135
50	0,039	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153	0,172	0,191	0,210
70	0,076	0,113	0,150	0,187	0,225	0,262	0,299	0,335	0,374	0,411
100	0,155	0,231	0,307	0,383	0,459	0,535	0,611	0,687	0,763	0,839
140	0,303	0,452	0,601	0,750	0,899	1,048	1,197	1,346	1,495	1,644
200	0,618	0,923	1,227	1,531	1,835	2,139	2,443	2,747	3,052	3,356
250	0,966	1,441	1,916	2,392	2,867	3,342	3,817	4,292	4,768	5,243

Kebutuhan udara dihitung dengan satuan liter/menit (l/min) sesuai dengan standar kapasitas kompresor. Maka kebutuhan daya kompresor sbb:

1. Silinder kerja tunggal $Q = s . n . q$ (l/min)
2. Silinder kerja ganda $Q = 2 . (s . n . q)$ (l/min)

Keterangan:

Q = kebutuhan udara silinder (l/min)

q = kebutuhan udara persentimeter langkah piston

s = panjang langkah piston (cm)

n = jumlah siklus kerja per menit

C. Kecepatan Piston

Kecepatan langkah rata-rata piston sekitar antara 0,1-1,5 m/s (6-90 m/min). Ada beberapa silinder dengan kebutuhan khusus mencapai kecepatan 10 m/s. Faktor kecepatan dari silinder pneumatik yaitu beban (gaya yang melawan silinder), tekanan kerja, diameter dalam dan panjang saluran antara silinder dan katup kontrol arah, dan ukuran katup yang digunakan.

Pengaturan kecepatan langkah dapat diatur berdasarkan katup pengontrol aliran dan dapat ditingkatkan dengan menambahkan katup pembuang cepat yang dipasang pada sistem kontrol tersebut. Kecepatan rata-rata piston tergantung dari gaya luar yang melawan piston (beban) dan ukuran lubang aliran dapat dilihat seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.7 Perbandingan kecepatan piston terhadap parameter lubang masuk. (Sumber: SMC Pneumatics, 1997).

Diameter Piston mm	Lubang Masuk mm	Beban dalam %				
		0	20	40	60	80
		Kecepatan Piston dalam mm/detik				
25	4	580	530	450	380	300
35	7	980	885	785	690	600
50	7	480	440	400	360	320
70	7	230	215	200	180	150
70	9	530	470	425	380	310
100	7	120	110	90	80	60
100	9	260	230	205	180	130
140	9	130	120	110	90	70
140	12	300	260	230	200	170
200	9	65	60	55	50	40
200	12	145	130	120	105	85
200	19	330	300	280	250	215
250	19	240	220	185	165	115

D. Langkah Piston

Langkah pneumatik dibatasi tidak melebihi 2 m, sedangkan untuk silinder *rodless* tidak melebihi 10 m. Akibat langkah yang panjang maka tekanan mekanik dari batang piston dan bantalan menjadi terlalu besar. upaya untuk menghindari hal tersebut yaitu diameter batang piston pada langkah panjang sedikit lebih besar.

2.5.5 Produksi Udara Bertekanan

Sistem pneumatik memerlukan udara bertekanan untuk menjamin keadaan sistem itu sendiri. Sistem memerlukan ketersediaan udara berkualitas baik seperti

bersih, kering dan tekanan yang tepat. Untuk itu diperlukan beberapa unit komponen tambahan yang fungsinya sebagai unit pengadaan udara.

A. Kompresor

Kompresor adalah mesin untuk memampatkan udara atau gas. Udara dari atmosfer merupakan pasokan udara yang akan dimampatkan, udara yang telah mampat akan berada pada tekanan yang konstan atau sesuai dengan kebutuhan tekanan. Selain udara atmosfer, kompresor mampu memampatkan udara yang lebih tinggi dari tekanan atmosfer atau yang disebut kompresor penguat, sebaliknya pompa vakum merupakan kompresor yang menghisap gas yang bertekanan lebih rendah dari atmosfer.

Karakteristik dari kompresor yang terpenting adalah volume gas dikeluarkan pada satuan m^3/min atau l/min dan tekanan kerja pada satuan bar. Dalam memilih kompresor harus menyesuaikan terhadap kebutuhan tekanan kerja dan jumlah udara yang dibutuhkan.

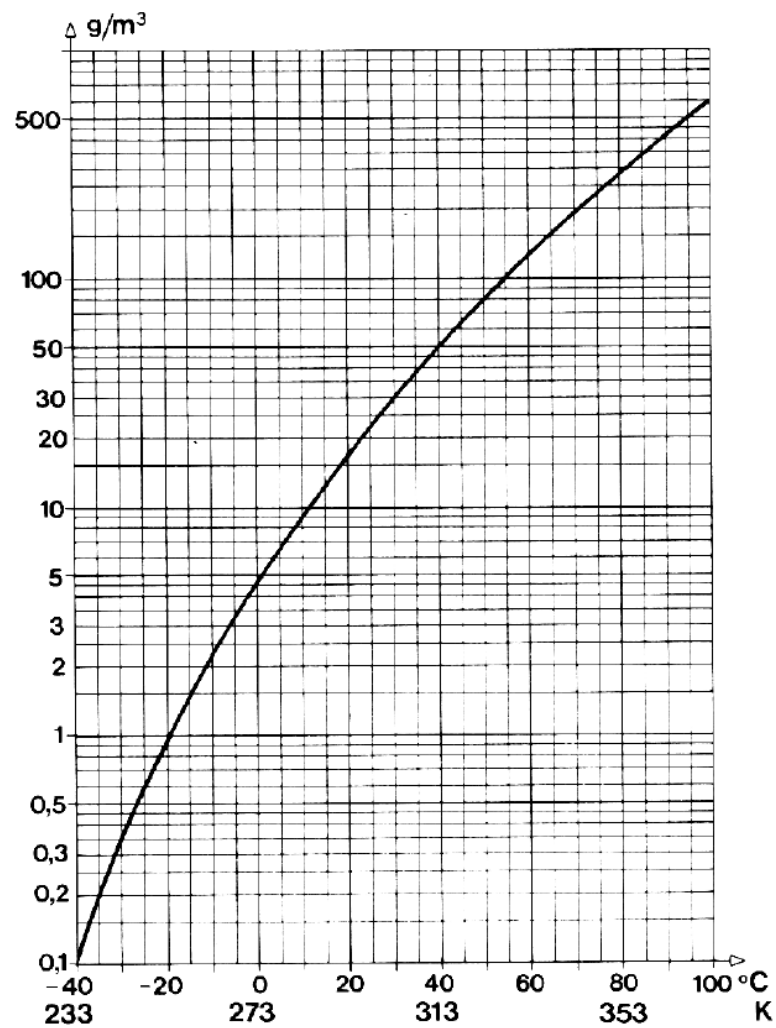
B. Tangki udara

Penggunaan tangki memiliki beberapa peranan yaitu untuk mendapatkan tekanan yang konstan pada sistem pneumatik, dengan tidak mengindahkan beban yang fluktuatif. Ketika terjadi kerusakan pada sistem kompresor, ketersediaan tangki akan menggantikan kebutuhan udara bertekanan yang tiba-tiba membesar. Selain itu, pada tangki perlu adanya tambahan kran pembuangan air, dimana air berasal akibat dari kondensasi udara bertekanan yang disuplai dari kompresor yang masuk ke dalam tangki.

Idealnya unit tangki memiliki beberapa tambahan komponen seperti manometer, termometer, katup pembatas tekanan, katup pengatur tekanan, pembuangan air, dan pintu tangki. Komponen tersebut perlu diperhatikan jika hendak memilih tangki udara, selain itu ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan ukuran tangki yaitu tergantung pada volume udara yang ditarik oleh kompresor, pemakaian udara konsumen, ukuran saluran, jenis dari pengaturan siklus kerja kompresor, dan penurunan tekanan yang diperkenankan dari jaringan saluran.

C. Pengering udara

Kondensasi yang terjadi pada unit kompresor dapat menyebabkan kerusakan pada sistem kompresor itu sendiri maupun pada sistem pneumatik yang memerlukan suplai udara bertekanan, sehingga komponen pengering udara perlu disertakan untuk memperkecil kondensasi yang terjadi. Udara dari atmosfer mengandung uap air yang akan menjadi air apabila titik jenuh dari kelembaban udara mencapai 100%.



Gambar 2.7 Hubungan kandungan air dan temperature pada kelembaban 100% (Sumber: Parr, 1998)

D. Saluran Udara

Ketersediaan udara bertekanan akan didistribusikan ke beban aktuator melalui saluran udara. Dalam memilih pipa saluran udara perlu memerhatikan hal-hal seperti ukuran pipa, bahan pipa, dan instalasi pipa udara bertekanan.

E. Unit pelayanan udara

Pada unit pelayanan udara terdapat komponen pendukung seperti filter, pengatur tekanan, dan pelumasan pipa udara. Komponen tersebut perlu dikombinasikan ukuran dan jenisnya dengan tepat terhadap permintaan unit kontrol. Unit pelayanan udara disebut juga sebagai unit pemeliharaan sistem pneumatik, karena unit ini berperan langsung untuk menjamin ketersediaan kualitas udara yang baik.

2.6 Analisa Kekuatan Material

2.6.1 Keseimbangan benda tegar

Benda tegar atau benda yang tidak mengalami perubahan akibat gaya luar akan mengalami keseimbangan jika sistem gayanya ekuivalen sama dengan nol. Secara teoritis dapat ditulis sbb:

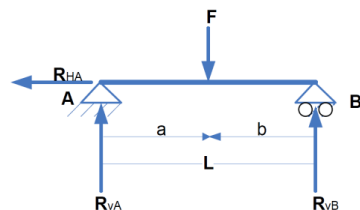
$$\Sigma F_x = 0, \quad \Sigma F_y = 0, \quad \Sigma M_A = 0$$

Keterangan: ΣF_x = Jumlah gaya pada sumbu X (N)

ΣF_y = Jumlah gaya pada sumbu Y (N)

ΣM_A = Jumlah momen pada titik A (Nm)

Dalam menganalisa suatu pembebanan atau mekanika diperlukan penyederhanaan untuk memahami dan menggambarkan permasalahan keseimbangan gaya dari suatu benda. Diagram benda bebas merupakan diagram yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan tersebut.



Gambar 2.8 Diagram benda bebas balok sederhana
(Sumber: Irawan, 2007)

Gambar 2.11 digunakan untuk menyelesaikan permasalahan sebuah gaya F yang bekerja pada suatu balok yang ditumpu oleh dua tumpuan sendi dan rol masing-masing R_{va} dan R_{vb} . AB merupakan diagram benda bebas dengan demikian persoalan diatas dapat diselesaikan sbb:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{maka } R_{HA} = 0 \quad (\text{tidak ada aksi})$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{maka } R_{VA} + R_{VB} - F = 0$$

$$\Sigma M_A = 0 \quad \text{maka } F \cdot a - R_{VB} \cdot L = 0 \quad R_{VB} = \frac{F \cdot a}{L}$$

$$\Sigma M_B = 0 \quad \text{maka } F \cdot b - R_{VA} \cdot L = 0 \quad R_{VA} = \frac{F \cdot b}{L}$$

2.6.2 Gaya dan tegangan

Gaya pada suatu luasan benda mampu mengakibatkan tegangan, tegangan yang terjadi bisa tegangan normal maupun tegangan geser. Secara sederhana tegangan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas penampang.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (N/mm^2)$$

Keterangan:

F = gaya (N)

A = Luas penampang (mm^2)

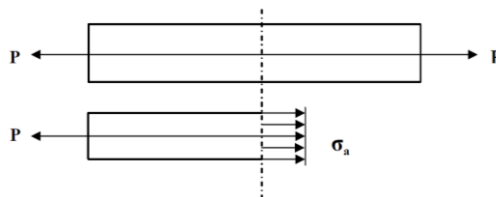
Tegangan secara umum terbagi menjadi dua jenis yaitu:

A. Tegangan Normal (σ):

Tegangan normal terbagi menjadi dua yaitu tegangan akibat beban aksial (σ_a) dan tegangan akibat momen lentur (σ_b). Gaya-gaya yang bekerja pada tegangan normal bekerja tegak lurus terhadap suatu bidang.

1. Tegangan normal akibat beban aksial

Tegangan pada arah aksial (tarik/tekan) bekerja tegak lurus terhadap suatu bidang.



Gambar 2.9 Tegangan normal akibat beban aksial
(Sumber: Irawan, 2007)

Besarnya tegangan normal akibat gaya aksial adalah sbb:

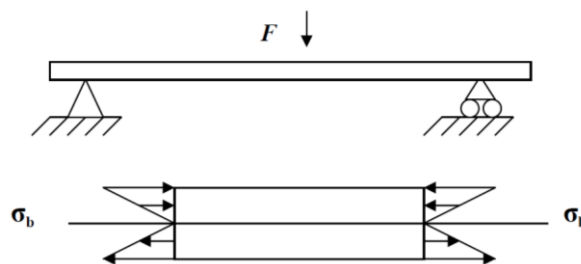
$$\sigma_a = \frac{F}{A}$$

Keterangan: σ_a = Tegangan normal akibat beban aksial (N/mm²)

A = Luas penampang batang (m²)

F = Gaya (N)

2. Tegangan normal akibat momen lentur



Gambar 2.10 Tegangan normal akibat momen lentur
(Sumber: Irawan, 2007)

Besar tegangan akibat momen lentur yaitu:

$$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I}$$

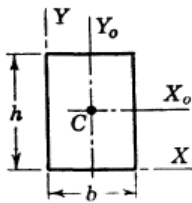
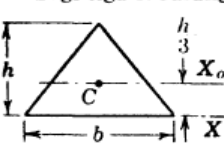
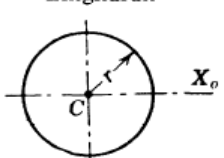
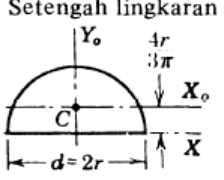
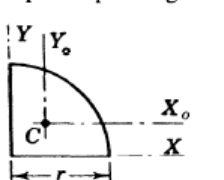
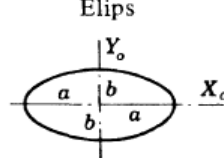
Keterangan: σ_b = Tegangan akibat momen lentur (N/m²)

M = Momen lentur (Nm)

I = Momen inersia penampang (m⁴)

y = Jarak antara sumbu titik berat dengan kulit terluar (m)

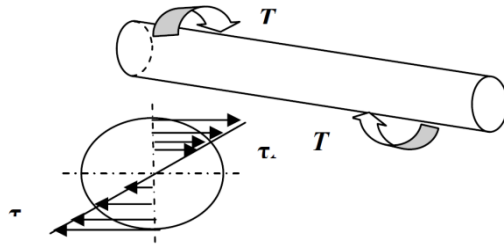
Tabel 2.8 Momen inersia untuk berbagai bentuk geometris (Sumber: Irawan, 2007)

BENTUK	MOMEN INERSIA	
<p>Segi empat</p> 	$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{12}$ $I_x = \frac{bh^3}{3}$	$\bar{k}_x = \frac{h}{\sqrt{12}}$ $k_x = \frac{h}{\sqrt{3}}$
<p>Segi tiga sebarang</p> 	$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36}$ $I_x = \frac{bh^3}{12}$	$\bar{k}_x = \frac{h}{\sqrt{18}}$ $k_x = \frac{h}{\sqrt{6}}$
<p>Lingkaran</p> 	$\bar{I}_x = \frac{\pi r^4}{4}$ $J = \frac{\pi r^4}{2}$	$\bar{k}_x = \frac{r}{2}$ $\bar{k}_z = \frac{r}{\sqrt{2}}$
<p>Setengah lingkaran</p> 	$I_x = \bar{I}_y = \frac{\pi r^4}{8}$ $\bar{I}_x = 0.11r^4$	$k_x = \bar{k}_y = \frac{r}{2}$ $\bar{k}_x = 0.264r$
<p>Seperempat lingkaran</p> 	$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{16}$ $\bar{I}_x = \bar{I}_y = 0.055r^4$	$k_x = k_y = \frac{r}{2}$ $\bar{k}_x = \bar{k}_y = 0.264r$
<p>Elips</p> 	$\bar{I}_x = \frac{\pi ab^3}{4}$ $\bar{I}_y = \frac{\pi ba^3}{4}$	$\bar{k}_x = \frac{b}{2}$ $\bar{k}_y = \frac{a}{2}$

B. Tegangan geser (τ):

Tegangan geser diakibatkan akibat gaya geser maupun torsi. Gaya yang bekerja sepanjang atau sejajar dengan luas penahan gaya. Tegangan geser dibagi menjadi dua sbb:

1. Tegangan geser akibat torsi



Gambar 2.11 tegangan geser akibat torsi
(Sumber: Irawan, 2007)

Besar tegangan geser akibat torsi adalah:

$$\tau_t = \frac{T_r}{J}$$

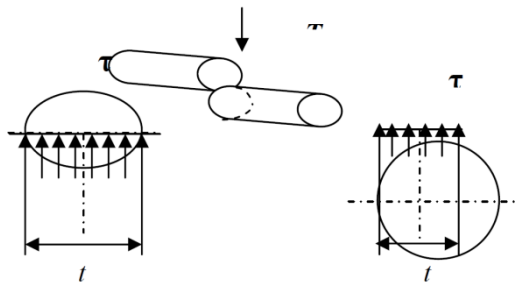
Keterangan: τ_t = Tegangan geser akibat torsi (N/mm²)

T = Torsi (Nm)

r = Jari-jari (m)

J = Momen inersia polar (m⁴)

2. Tegangan geser akibat gaya geser



Gambar 2.12 tegangan geser akibat gaya geser
(Sumber: Irawan, 2007)

Besarnya tegangan geser akibat gaya geser yaitu:

$$\tau_s = \frac{V \cdot q}{I \cdot t}$$

Keterangan: τ_s = tegangan geser (N/mm²)

V = gaya geser (N)

q = momen statis (m³)

I = Momen Inersia (m⁴)

t = lebar potongan penampang (m)

2.6.3 *Buckling*

Fenomena kegagalan yang terjadi pada sebuah struktur yang menerima tekanan atau beban akan menyebabkan setidaknya perubahan bentuk pada struktur tersebut berupa defleksi lateral ke bentuk kesetimbangannya yang lain biasa disebut dengan penekunan atau *buckling*.

A. Rumus euler pada kolom ideal dengan berbagai macam tumpuan.

Buckling yang terjadi pada sebuah batang dapat ditentukan menggunakan rumus euler sebagai berikut:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_k^2 \times \nu}$$

Keterangan:

F_{cr} = Gaya kritis (N)

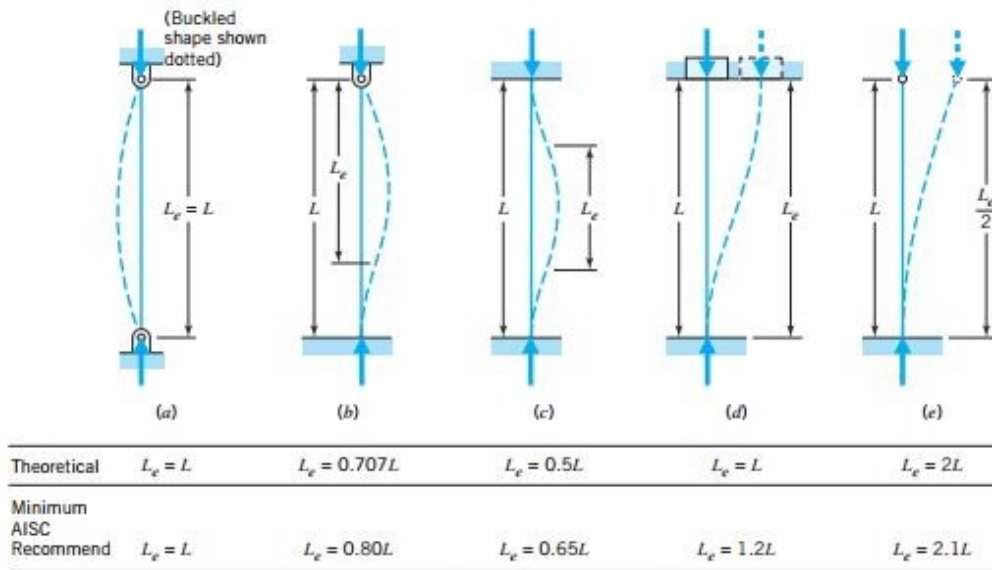
E = Modulus Elastisitas (GPa)

I = Inersia penampang batang (mm^4)

L_k = *Free bucking length* (mm)

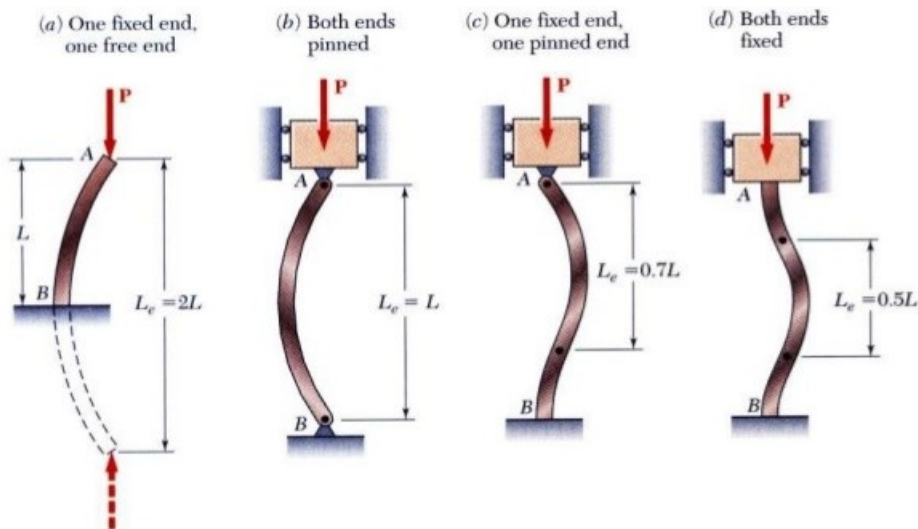
ν = Faktor keamanan (2,5-3,5)

bentuk-bentuk atau metode pemasangan batang konstruksi dan pada sebuah aktuator hidrolis maupun pneumatik dapat dilihat pada tabel dibawah ini.



Source: From *Manual of Steel Construction*, 7th ed., American Institute of Steel Construction, Inc., New York, 1970, pp. 5-138.

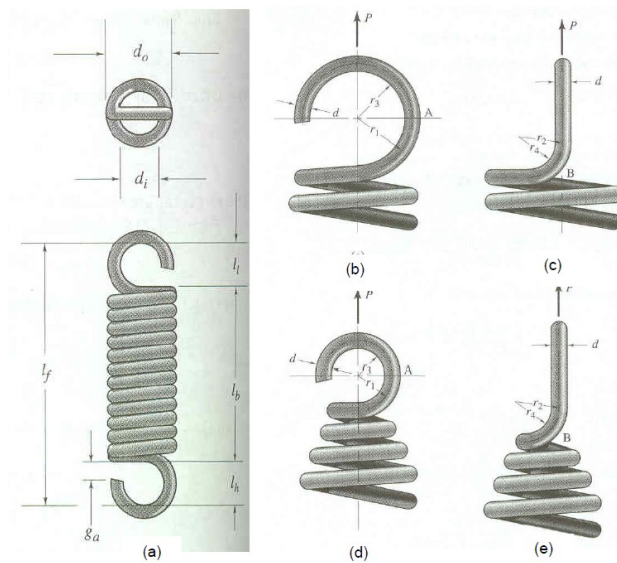
Gambar 2.13 Metode pemasangan batang konstruksi.
(Sumber: *Manual of steel construction*, 1974)



Gambar 2.14 Metode pemasangan batang pada hidrolik dan pneumatik
(Sumber: *Manual of steel construction*, 1974)

2.6.4 Pegas Tarik

Pegas tarik memiliki konstruksi khusus dengan ditambahkan hook (kait). Dimensi utama dari pegas tarik dapat dilihat pada gambar 2.15, bentuk standar dari hook dibuat dengan menekuk lilitan terakhir sebesar 90° terhadap lilitan.



Gambar 2.15 pegas helik tarik (a) geometri, (b) bentuk hook konvensional, (c) pandangan samping, (d) improve design, (e) pandangan samping
(Sumber: Irawan, 2007)

A. Lilitan aktif

Lilitan yang ada didalam pegas merupakan jumlah lilitan aktif, untuk pegas tarik satu lilitan ditambahkan untuk menentukan panjang pegas L_b .

$$N_t = N_a + 1$$

$$L_b = d \times N_t$$

Keterangan: N_a = jumlah lilitan aktif

d = diameter kawat pegas

B. Panjang pegas bebas (L_f)

Panjang bebas diukur antara sisi dalam hook atau loop yaitu:

$$L_f = L_b + L_h + L_l$$

C. Indeks pegas (c)

Indeks pegas merupakan perbandingan antara diameter lilitan dengan kawat pegas.

$$c = \frac{D}{d}$$

Keterangan: D = Diameter lilitan pertengahan

d = diameter kawat

D. Defleksi

Defleksi merupakan turunan pertama terhadap beban, sehingga dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\delta = \frac{8W \cdot c^3 \cdot N_a}{G \cdot d} \left(1 + \frac{0,5}{c^2}\right)$$

E. Konstanta pegas

Pegas tarik memiliki karakteristik berbeda dengan pegas tarik, perlu menambahkan gaya awal W_1 sebelum mulai terjadi defleksi, sehingga konstanta pegas atau *spring rate* adalah:

$$K = \frac{W - W_1}{\delta} = \frac{d^4 \cdot G}{8N_a \cdot D^3} = \frac{d \cdot G}{8N_a \cdot c^3}$$

Keterangan: W = beban yang diterima (N)

W_1 = beban awal (N)

G = Modulus geser (Mpa)

d = diameter kawat (mm)

sementara untuk *spring rate* untuk n buah pegas yang disusun paralel adalah

$$k_{tot} = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

Tabel 2.9 Sifat-sifat mekanik material pegas (sumber: Standar ASTM material pegas)

Common name	Specification	Modulus of elasticity, E , psi	Shear modulus of elasticity, G , psi	Density, ρ , lbf/in. ³	Maximum service temperature, °F	Principal characteristics
High-carbon steels						
Music wire	ASTM A228	30×10^6	11.5×10^6	0.283	250	High strength; excellent fatigue life
Hard drawn	ASTM A227	30×10^6	11.5×10^6	.283	250	General purpose use; poor fatigue life
Stainless steels						
Martensitic	AISI 410, 420	29×10^6	11×10^6	.280	500	Unsatisfactory for subzero applications
Austenitic	AISI 301, 302	28×10^6	10×10^6	.282	600	Good strength at moderate temperatures; low stress relaxation
Copper-based alloys						
Spring brass	ASTM B134	16×10^6	6×10^6	.308	200	Low cost; high conductivity; poor mechanical properties
Phosphor bronze	ASTM B159	15×10^6	6.3×10^6	.320	200	Ability to withstand repeated flexures; popular alloy
Beryllium copper	ASTM B197	19×10^6	6.5×10^6	.297	400	High elastic and fatigue strength; hardenable
Nickel-based alloys						
Inconel 600	—	31×10^6	11×10^6	.307	600	Good strength; high corrosion resistance
Inconel X-750	—	31×10^6	11×10^6	.298	1100	Precipitation hardening; for high temperatures
Ni-Span C	—	27×10^6	9.6×10^6	.294	200	Constant modulus over a wide temperature range

F. Faktor tegangan *wahls*

$$K = \frac{4c - 1}{4c - 4} + \frac{0,615}{c}$$

G. Tegangan geser pada kawat

Pegas dengan penampang kawat lingkaran, dengan diameter kawat d maka berdasarkan perencanaan mekanika didapat tahan puntirnya adalah:

$$\tau_{maks} = \frac{8 \cdot D \cdot F}{\pi d^3} \left(1 + \frac{1}{2c} \right)$$

2.7 Perpindahan Kalor

2.7.1 Pengertian Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor merupakan fenomena perpindahan energi, pada kasus ini yaitu energi kalor (*thermal*). Pengaplikasian perpindahan kalor sudah mencakup hampir seluruh aspek kehidupan. Dalam dunia teknik penerapan perpindahan kalor terdapat pada banyak alat penukar kalor seperti boiler dan AC.

Perpindahan kalor memegang aspek penting dalam menentukan keefektifan, efisiensi dan keamanan operasi dari peralatan maupun sistem yang bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari. Laju perpindahan kalor menjadi parameter penunjuk seberapa cepat perpindahan kalor itu sendiri. Proses perpindahan panas berlangsung dalam 3 mekanisme yaitu Konduksi, Konveksi, dan Radiasi (Cengel & Boles, 1994).

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t}$$

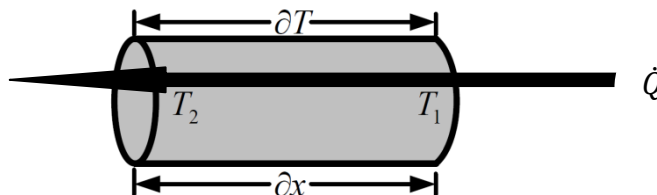
Dimana: \dot{Q} = Laju perpindahan kalor (Watt)

Q = Energi kalor yang dipindahkan (Joule)

Δt = Waktu untuk memindahkan kalor (detik)

2.7.2 Konduksi

Perpindahan panas konduksi yaitu perpindahan panas tanpa diikuti gerakan makroskopik mediumnya. Konduksi yang sering dikenal merambat melalui benda padat, ternyata konduksi dapat terjadi pada benda cair atau gas dengan kondisi mediumnya tidak bergerak selama proses perpindahan kalor berlangsung.



Gambar 2.16 perpindahan kalor konduksi
(Cengel & Boles, 1994)

Pada gambar 2.16 perpindahan kalor selalu mengalir menuju lokasi medium yang memiliki temperatur lebih rendah dan arahnya selalu tegak lurus dengan luas permukaan perpindahan kalor. Dengan menerapkan persamaan kesetaraan konstanta dimana δx mendekati 0 maka didapat persamaan konduksi Fourier.

$$\dot{Q} = -k \cdot A \frac{\delta T}{\delta x}$$

Dimana: \dot{Q} = Laju perpindahan kalor (Watt)

k = Konduktivitas termal ($W/m^{\circ}C$)

A = Luas penampang perpindahan kalor (m^2)

$\delta T/\delta x$ = Gradien temperatur ($^{\circ}C/m$ atau K/m)

Tanda negatif (-) pada persamaan diatas menunjukkan bahwa perpindahan kalor selalu mengalir dari lokasi temperatur tinggi ke lokasi yang lebih rendah (Cengel & Boles, 1994). Nilai konduktivitas termal berbagai bahan diberikan pada tabel 2.10

Tabel 2.10 Konduktivitas termal berbagai bahan 0°C (Holman, 1997)

<i>Material</i>	<i>Thermal conductivity</i> <i>k</i>	
	<i>W/m · °C</i>	<i>Btu/h · ft · °F</i>
Metals:		
Silver (pure)	410	237
Copper (pure)	385	223
Aluminum (pure)	202	117
Nickel (pure)	93	54
Iron (pure)	73	42
Carbon steel, 1% C	43	25
Lead (pure)	35	20.3
Chrome-nickel steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Nonmetallic solids:		
Quartz, parallel to axis	41.6	24
Magnesite	4.15	2.4
Marble	2.08–2.94	1.2–1.7
Sandstone	1.83	1.06
Glass, window	0.78	0.45
Maple or oak	0.17	0.096
Sawdust	0.059	0.034
Glass wool	0.038	0.022
Liquids:		
Mercury	8.21	4.74
Water	0.556	0.327
Ammonia	0.540	0.312
Lubricating oil, SAE 50	0.147	0.085
Freon 12, CCl ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
Hydrogen	0.175	0.101
Helium	0.141	0.081
Air	0.024	0.0139
Water vapor (saturated)	0.0206	0.0119
Carbon dioxide	0.0146	0.00844

2.7.3 *Electric heater*

Heater memiliki peran mengonversi energi listrik menjadi panas. Besarnya daya heater yang dibutuhkan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu, waktu pemanasan, massa material yang akan dipanaskan, panas jenis material, kenaikan temperature yang diinginkan. Untuk menentukan daya heater menggunakan persamaan dari produsen heater sbb:

$$Q = \frac{m \cdot C \cdot \Delta T}{860 \cdot t \cdot \eta}$$

Dimana:

- Q = Daya heater (kWatt)
- C = Panas jenis material yang dipanaskan, (kcal/kg.°C)
- m = Massa barel (kg)
- ΔT = Kenaikan suhu
- t = Waktu pemanasn (jam)
- η = Efisiensi (0,1-0,5)