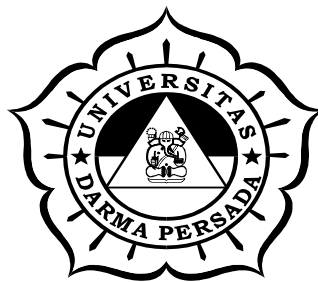


DIKTAT KULIAH
MESIN KONVERSI ENERGI



TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
2011

DIKTAT KULIAH

MESIN KONVERSI ENERGI

Disusun

ASYARI DARAMI YUNUS

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Untuk memenuhi buku pegangan dalam perkuliahan, terutama yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, maka kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku/diktat yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin. Kali ini penulis menyiapkan diktat yang ditujukan untuk mata kuliah Mesin Konversi Energi.

Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan materinya dengan kurikulum di jurusan Teknik Mesin, Universitas Darma Persada Indonesia. Buku ini berisikan teori-teori tentang mesin konversi energi. Soal-soal dan penyelesaian yang berkaitan dengan diktat ini akan dibuat terpisah menjadi diktat tersendiri supaya diktat ini tidak menjadi tebal. Teori tentang pengujian dan prestasi mesin konversi energi akan dibuat diktat tersendiri dengan judul Teknik Pengujian Mesin.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Mesin Konversi Energi, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini.

Jakarta, April 2011

IR. ASY'ARI DARYUS SE. MSc.

DAFTAR ISI

BAB 1. Klasifikasi, Sumber-Sumber dan Pemakaian Energi.	1
BAB 2. Bahan Bakar Utama.	6
BAB 3. Ketel Uap.	26
BAB 4. Turbin Uap.	49
BAB 5. Turbin Gas.	72
BAB 6. Turbin Air.	88
BAB 7. Mesin Pembakaran Dalam.	126
BAB 8. Pompa.	154
BAB 9. Kompresor Udara.	188

BAB 1

KLASIFIKASI, SUMBER-SUMBER DAN PEMAKAIAN ENERGI

Klasifikasi Dan Jenis-jenis Energi

Energi dikategorikan atas dua bentuk umum yaitu: *energi transisional* dan *energi tersimpan*. Energi transisional adalah energi yang sedang bergerak dan dapat berpindah melintasi batas sistem. Energi tersimpan adalah energi yang berwujud sebagai massa, posisi dalam medan gaya, dan lain-lain. Energi tersimpan bisa dirubah ke dalam bentuk energi transisional.

Energi bisa dikelompokkan atas 6 yaitu :

1. Energi mekanik
2. Energi listrik
3. Energi elektromagnetik
4. Energi kimia
5. Energi nuklir
6. Energi panas (termal).

Energi Mekanik yaitu suatu energi yang dapat digunakan untuk mengangkat suatu benda. Dalam SI satuan energinya adalah joule (watt-detik) dan satuan daya adalah watt. Kerja adalah merupakan bentuk transisional dari energi mekanik. Energi mekanik dapat disimpan dalam bentuk energi potensial maupun energi kinetik.

Energi listrik yaitu energi yang berkaitan dengan arus dan akumulasi elektron. Energi jenis ini dinyatakan dalam satuan daya-waktu, misalnya watt-jam atau kilowatt-jam. Bentuk transisional dari energi listrik adalah aliran elektron.

Energi elektromagnetik adalah bentuk energi yang berkaitan dengan radiasi elektromagnetik. Energi radiasi biasanya dinyatakan dalam satuan energi yang sangat kecil seperti elektron-volt (eV). Radiasi elektromagnetik adalah bentuk energi murni dimana tidak berkaitan dengan massa. Energi ini hanya merupakan energi transisional yang bergerak dengan kecepatan cahaya. Energi ini dirumuskan sebagai:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

dengan: E = energi, joule

c = kecepatan cahaya

h = konstanta planck = $6,626 \times 10^{-34}$ J.s

ν = frekwensi

λ = panjang gelombang

Energi kimia adalah energi yang keluar sebagai hasil interaksi elektron dimana dua atau lebih atom dan/atau molekul-molekul membentuk senyawa kimia yang stabil. Energi kimia hanya dapat terjadi dalam bentuk energi tersimpan. Jika energi dilepaskan dalam suatu reaksi kimia, reaksi ini disebut reaksi eksotermis, dan sebaliknya jika energi diserap dalam suatu reaksi kimia maka reaksi disebut reaksi endotermis.

Energi nuklir adalah energi yang dilepaskan sebagai hasil usaha partikel-partikel untuk mendapatkan konfigurasi yang lebih stabil. Energi ini hanya ada sebagai energi tersimpan yang terlepas akibat interaksi partikel. Energi nuklir biasanya dinyatakan dalam satuan juta-elektron per reaksi.

Energi termal adalah bentuk energi dasar dengan kata lain, semua bentuk energi dapat dikonversi secara penuh ke energi ini. Energi ini berkaitan dengan getaran atom dan molekul.

Sumber-sumber Energi

Sumber-sumber energi dikelompokkan atas dua kategori umum yaitu:

- *energi celestial* atau energi perolehan yaitu energi yang mencapai bumi dari angkasa luar
- *energi modal* yaitu energi yang telah ada pada atau di dalam bumi.

Sumber-sumber energi celestial seperti elektromagnetik, energi partikel dan gravitasional dari bintang-bintang, planet-planet dan bulan, dan juga energi potensial meteor yang sedang memasuki bumi. Sumber energi yang sangat berguna dari energi celestial adalah energi elektromagnetik dari matahari yang disebut energi surya langsung serta energi potensial dari bulan yang menghasilkan aliran pasang.

Energi surya langsung juga menghasilkan sumber-sumber energi tak langsung yang tak terhabiskan. Pemanasan surya bersama dengan rotasi bumi menghasilkan beberapa

arus konveksi besar dalam bentuk angin di atmosfer dan arus laut di samudra. Penyerapan energi surya oleh laut juga menghasilkan energi potensial untuk memproduksi tenaga. Penguapan permukaan air yang akan menimbulkan awan dan pada akhirnya menghasilkan hujan akan menjadi sumber energi hidroelektrik atau tenaga air.

Energi bulan terutama berupa energi gravitasi bulan menghasilkan gelombang air pasang yang mempunyai perbedaan ketinggian hingga 30 feet (9 meter) di tempat-tempat tertentu. Perubahan ketinggian air laut bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dengan memasang turbin air. Potensi total dari seluruh sistem tenaga air pasang dunia diperkirakan mencapai 64.000 MW.

Sumber utama energi modal yang banyak digunakan adalah energi atom, yaitu energi yang dihasilkan oleh reaksi atom. Energi nuklir dan energi kimia termasuk dalam kategori ini.

Energi modal yang lain yang dimanfaatkan adalah energi termal yaitu berupa uap, air panas yang disempotkan dari bawah permukaan bumi. Energi geotermal bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Gambar 1 memperlihatkan sistem pembangkit tenaga geotermal.

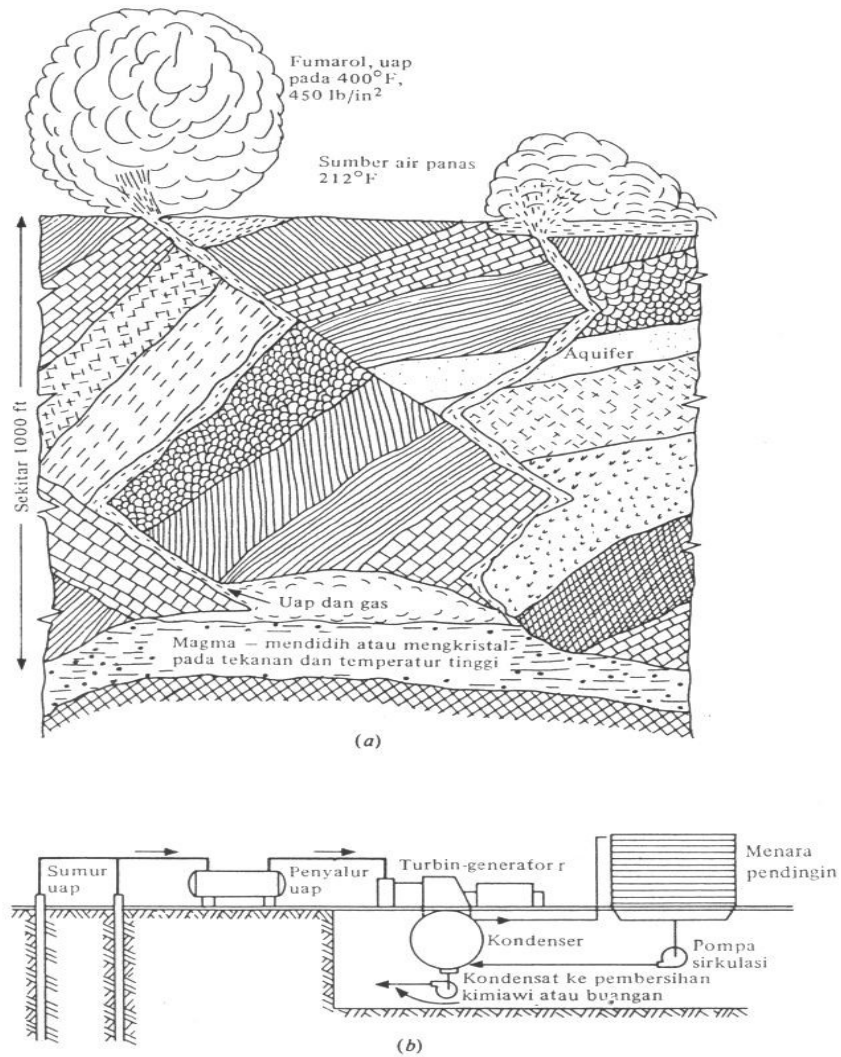
Pemanfaatan Energi

Pada tahap awal peradaban, manusia menghasilkan energi dari pembakaran karbohidrat (tumbuhan dan kayu). Kemudian dalam perkembangannya, manusia banyak memanfaatkan berbagai jenis energi. Energi angin digunakan untuk menggerakkan perahu dan kincir angin, tenaga air dan energi panas digunakan untuk memberikan energi mekanik.

Di sekitar tahun 1900an batubara mulai digunakan sebagai bahan bakar. Pada tahun 1970 di Amerika Serikat, 75% energi bahan bakar menggunakan bahan bakar minyak dan gas alam. Penggunaan energi dalam dasawarsa terakhir menunjukkan peningkatan yang tajam terutama dalam penggunaan bahan bakar minyak dan gas alam cair (LNG), energi hidroelektrik dan nuklir.

Penggunaan energi di AS paling banyak dikonsumsi oleh sektor pembangkitan listrik diikuti pemakaian di industri, transportasi, dan rumah tangga & komersil. Sumber daya

yang paling dominan digunakan adalah bahan bakar minyak di atas energi nuklir, gas alam dan batubara.



Gambar 1. Diagram skematik sebuah penyimpanan geotermal yang khas dari sebuah pembangkit.

Soal-soal

1. Coba anda jelaskan jenis-jenis energi.
2. Sebutkan perbedaan antara energi celestial dan energi modal.
3. Sebutkan energi yang dibangkitkan oleh gravitasi bulan.
4. Coba anda sebutkan sumber daya energi yang paling banyak digunakan saat ini di Indonesia, dan bagaimana prospek ketersediaannya di masa yang akan datang.

BAB II

BAHAN BAKAR UTAMA

Bahan Bakar Fosil

Bahan bakar fosil yang umum ada tiga jenis: yaitu batubara, minyak dan gas alam. Bahan bakar fosil dihasilkan dari pemfosilan senyawa karbohidrat. Senyawa karbohidrat dengan rumus kimia $C_x(H_2O)_y$, dihasilkan oleh tanaman-tanaman hidup melalui proses fotosintesis ketika ia merubah secara langsung energi surya menjadi energi kimia. Setelah tanaman mati, karbohidrat dirubah menjadi senyawa hidrokarbon dengan rumus kimia C_xH_y oleh tekanan dan panas dan proses yang lama.

Senyawa hidrokarbon terdiri dari karbon dan hidrogen. Atom hidrogen hanya mempunyai satu elektron sedangkan karbon mempunyai 4 elektron terluar sehingga 1 atom karbon bisa mengikat 4 atom hidrogen.

Ada 3 kelompok utama senyawa hidrokarbon yaitu:

- hidrokarbon alifatik
- hidrokarbon alisiklik dan
- hidrokarbon aromatik.

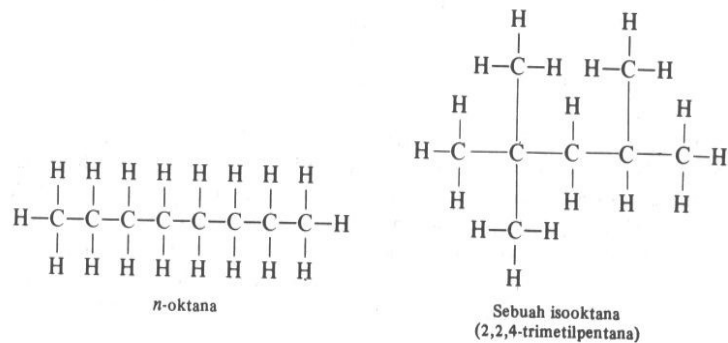
Hidrokarbon alifatik adalah senyawa rantai dan kebanyakan senyawa bahan bakar fosil termasuk ke dalam kelompok ini. Dua kelompok yang lain adalah jenis hidrokarbon cincin.

Hidrokarbon alifatik dibagi atas 3 sub kelompok yaitu: hidrokarbon alkana, alkena dan alkuna. Hidrokarbon alkana mempunyai rumus kimia umum C_nH_{2n+2} . Senyawa yang khas yang termasuk kelompok ini adalah :

Metana, CH_4	Pentana, C_5H_{12}	Nonana, C_9H_{20}
Etana, C_2H_6	Heksana, C_6H_{14}	Dekana, $C_{10}H_{22}$
Propana, C_3H_8	Heptana, C_7H_{16}	
Butana, C_4H_{10}	Oktana, C_8H_{18}	Heksadekana, $C_{16}H_{34}$

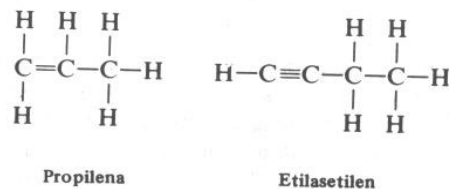
Kebanyakan gas alam terdiri dari gabungan metana dan etana, propana dan butana membentuk gas minyak tanah yang dicairkan, dan oktana adalah senyawa umum gasoline. Bila awalan “n” yang berarti normal, terdapat didepan nama hidrokarbon,

berarti bahwa semua atom karbon terhubung dalam sebuah rantai panjang. Awalan *iso* didepan nama hidrokarbon berarti bahwa nama hidrokarbon tersebut terdapat cabang-cabang atom karbon.

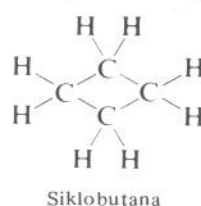


Kedua molekul di atas mempunyai rumus kimia dasar yang sama yaitu C_8H_{18} , tetapi mempunyai sifat-sifat fisik dan kimia yang sangat berbeda.

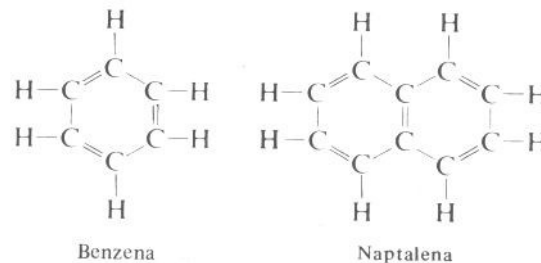
Sub kelompok alkena dan alkuna adalah senyawa hidrokarbon tak jenuh yaitu hidrokarbon yang mempunyai paling tidak dua atom karbon yang berbagi ikatan rangkap. Rumus umum alkena adalah C_nH_{2n} dan disebut rangkaian olefin. Hidrokarbon alkuna mempunyai rumus $C_nH_{2(n-1)}$ yang juga disebut rangkaian asetilen.



Dua kelompok hidrokarbon lainnya yaitu senyawa alisiklik dan aromatik disebut hidrokarbon cincin karena molekulnya tersusun seperti cincin. Hidrokarbon alisiklik mempunyai rumus umum C_nH_{2n} dan namanya biasanya berawalan *siklo* seperti siklobutana.



Hidrokarbon aromatik mempunyai rumus umum C_nH_{2n-12} . Contoh senyawanya bisa dilihat pada gambar berikut.



Bahan Bakar Standar

Ada sejumlah senyawa hidrokarbon yang digunakan sebagai standar bahan bakar bagi motor bakar. Bahan bakar bensin digolongkan berdasarkan bilangan oktannya, sedangkan bahan bakar solar (diesel) digolongkan berdasarkan bilangan cetananya.

Bahan bakar beroktan 100 adalah 2.2.4.-trimetilpentana (isooktana), sementara bahan bakar standar oktana 0 adalah *n*-heptana. Bilangan oktana suatu bahan bakar yang tidak diketahui diukur dengan mesin CFR (Cooperative Fuels Research Engine). Mesin ini adalah sebuah mesin silinder tunggal dengan perbandingan kompresi yang bisa diatur dari 4:1 hingga 14:1. Bahan bakar yang mau diuji, dibakar di dalam mesin dan perbandingan kompresinya dinaikkan perlahan-lahan sampai diperoleh ketukan (knock) atau pembacaan detonasi dari sebuah detektor vibrasi. Campuran bahan standar kemudian dibakar dengan angka kompresi yang sama hingga kira-kira diperoleh pembacaan ketukan yang sama. Prosentase volume bahan bakar oktana 100 dalam campuran tersebut adalah bilangan oktana dari bahan bakar yang dites tersebut. Besaran angka oktane bahan bakar bensin (gasoline) yang paling banyak dipakai berkisar antara 85 hingga 95.

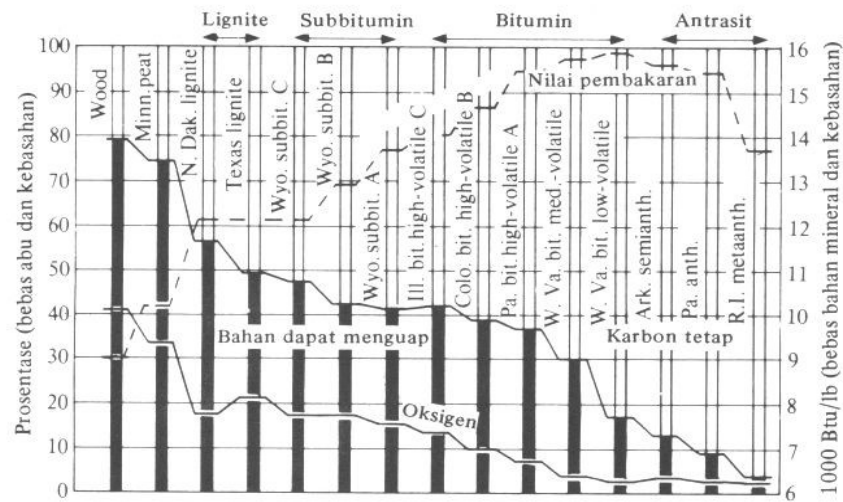
Beberapa jenis bensin premium mempunyai bilangan oktana yang lebih besar dari 100. Bilangan oktana yang lebih besar dari 100 diperoleh dengan menggunakan hidrokarbon yang lebih ringan dan/atau menambahkan bahan tambahan (additif) seperti tetra etil lead (TEL) ke dalam bahan bakar dasar.

Cetana 100 untuk bahan bakar diesel standar adalah *n*-heksadekana ($C_{16}H_{34}$), yang kadang-kadang disebut *n*-cetana. Standar cetana 0 adalah alfa-metilnaftalena ($C_{11}H_{10}$). Angka cetana suatu bahan bakar diesel tertentu adalah sama dengan prosentase volume *n*-

heksadekana dalam suatu campuran bahan bakar standar yang mempunyai karakteristik pembakaran yang sama di dalam mesin diesel CFR. Umumnya bahan bakar diesel mempunyai bilangan cetana antara 30 sampai 60.

Batubara

Batubara adalah bahan bakar fosil yang terbanyak, diperkirakan berasal dari tumbuhan-tumbuhan yang memfosil. Ditaksir bahwa paling tidak diperlukan 20 cm tumbuhan-tumbuhan yang dipadatkan untuk memperoleh lapisan batubara sebesar 1 cm. Tumbuhan yang padat ini tanpa adanya udara, dengan dipengaruhi oleh tekanan dan suhu tinggi selanjutnya akan berubah menjadi *turf* (tumbuhan lapuk), kemudian menjadi batubara coklat, lalu menjadi lignite, kemudian menjadi batubara subbitumin, lalu menjadi bitumin, dan akhirnya menjadi batubara antrasitik. Dengan berlangsungnya proses *aging* (penuaan), batubara akan menjadi keras, kandungan hidrogen dan oksigennya berkurang dan kandungan karbon meningkat. Gambar 1 memperlihatkan klasifikasi batubara berdasarkan umur.



Gambar 1. Variasi sifat-sifat dan komposisi batubara berdasarkan umur.

Batubara ditemukan dalam bentuk lapisan-lapisan di dalam kulit bumi. Menurut ASTM, batubara diklasifikasikan atas empat kategori utama dengan sub-sub divisi dalam setiap kelas. Berdasarkan sistem ini keempat kelas utama adalah batubara antrasitik (tertua), batubara bitumin, batubara subbitumin dan batubara lignitik. Klasifikasi menurut ASTM ini bisa dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi batubara berdasarkan tingkatan^a (ASTM D 388)

Kelas	Kelompok	Batas karbon tetap, % (basis bebas bahan mineral, kering)		Batas bahan dapat menguap (basis bebas bahan mineral, kering)		Batas nilai kalori, Btu/lb (basis bebas bahan mineral, basah ^b)		Karakter penggumpalan
		Lebih besar atau sama dengan	Lebih kecil dari	Lebih besar dari	Lebih kecil atau sama dengan	Lebih besar atau sama dengan	Lebih kecil dari	
I. Antrasitik	1. Metaantrasit	98	2	Tak menggumpal
	2. Antrasit	92	98	2	8	.....	.....
	3. Semiantrasit ^c	86	92	8	14	.....	.....
II. Bitumin	1. Batubara bitumin penguapan rendah	78	86	14	22	Biasanya menggumpal ^c
	2. Batubara bitumin penguapan sedang	69	78	22	31	.....	.....
	3. Batubara bitumin penguapan tinggi A	...	69	31	...	14,000 ^d	.....
	4. Batubara bitumin penguapan tinggi B	...	...	...	...	13,000 ^d	14,000
	5. Batubara bitumin penguapan tinggi C	...	...	...	...	11,500 ^d 10,500 ^e	13,000 11,500
III. Subbitumin	1. Batubara subbitumin A	10,500	11,500	Tak menggumpal
	2. Batubara subbitumin B	...	...	...	...	9,500	10,500
	3. Batubara subbitumin C	...	...	...	...	8,300	9,500
IV. Lignitik	1. Lignite A	6,300	8,300	Tak menggumpal
	2. Lignite B	...	...	...	...	.....	6,300

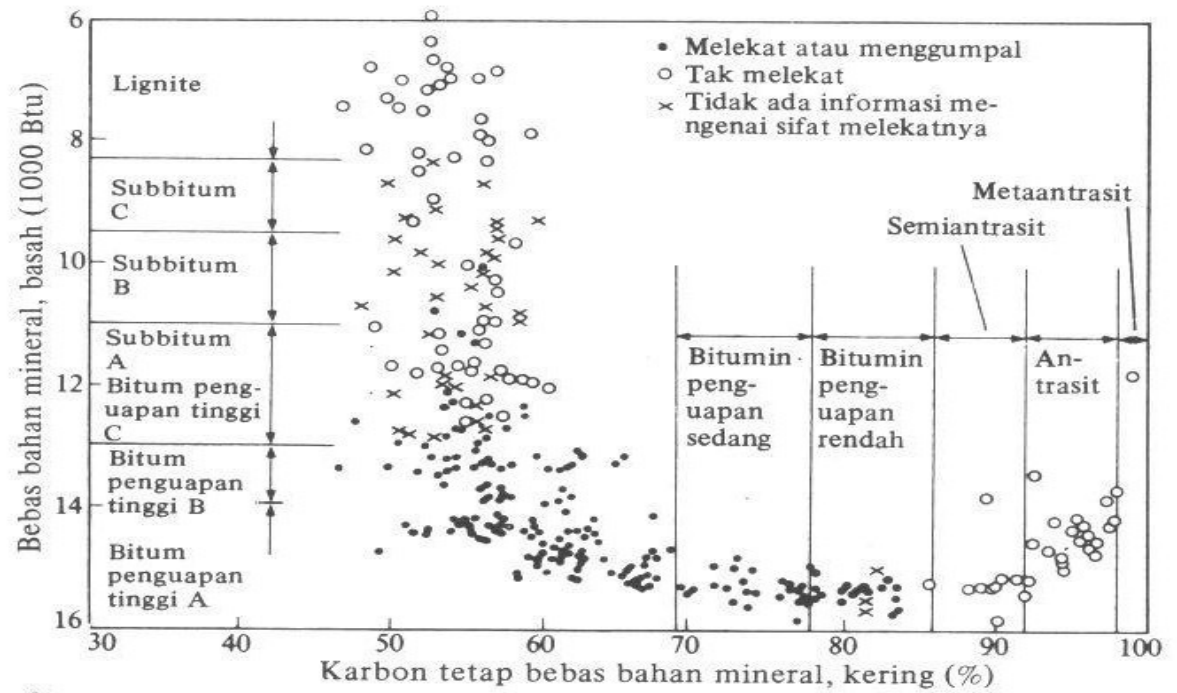
^a Klasifikasi ini tidak termasuk beberapa batubara, terutama varietas "nonbanded", yang mempunyai sifat-sifat fisik dan kimia yang tak biasa dan berada dalam batas karbon tetap atau nilai kalori dari kelas bitumin penguapan tinggi dan subbitumin. Semua batubara ini mengandung kurang dari 48% karbon tetap bebas bahan mineral, kering atau lebih dari 15.500 Btu/lb pada basis bebas bahan mineral, basah.

^b Basah dalam arti batubara mengandung kebasahan inheren alamiahnya tetapi tidak termasuk air yang terlihat pada permukaan batubara.

^c Jika menggumpal termasuk kelompok penguapan rendah dari kelas bitumin.

^d Batubara yang mempunyai 69% atau lebih karbon tetap dengan basis bebas bahan mineral, kering, harus diklasifikasikan tergantung pada karbon tetap, dengan mengabaikan nilai kalori.

^e Diakui bahwa mungkin terdapat varietas tak menggumpal dalam kelompok ini dari kelas bitumin, dan ada pengecualian yang nyata dalam kelompok bitumin C penguapan tinggi.



$$FC \text{ bebas-Mm, kering} = \frac{FC - 0.15S}{100 - (M + 1,08A + 0,55S)} \times 100 \quad \%$$

$$VM \text{ bebas-Mm, basah} = 100 - FC \text{ bebas-Mm, kering} \quad \%$$

$$Btu \text{ bebas-Mm, basah} = \frac{Btu - 50S}{100 - (1,08A + 0,55S)} \times 100 \quad \text{per lb}$$

- di mana Mm = bebas mineral
 Btu = nilai pembakaran per lb
 FC = karbon tetap, %
 VM = bahan menguap, %
 M = kebasahan alas, %
 A = abu, %
 S = sulfur, %

Semua untuk batubara dengan basis basah.

Analisis Batubara

Ada dua basis analisis batubara, yaitu **analisis proksimasi** dan **analisis ultimasi**. Kedua cara analisis ini memberikan fraksi-fraksi masa atau gravimetrik dari komponen-komponen didalam batubara.

Pada setiap lapisan batubara, terdapat dua komponen yang dapat menunjukkan variasi penting dari keseluruhan lapisan tersebut. Komponen tersebut adalah kebasahan dan abu. Fraksi abu bervariasi karena abu pada dasarnya adalah bahan anorganik yang mengendap bersama bahan organik pada waktu proses pematatan. Kadar kebasahan batubara sangat bervariasi, tergantung keterbukaan ke air tanah sebelum penambangan dan karena keterbukaan ke udara bebas sewaktu pengangkutan dan penyimpanan ke tempat akhir. Karena itu biasanya laporan analisis batubara dibuat dengan basis bebas abu, bebas kebasahan baik secara ultimasi ataupun secara proksimasi.

Analisis proksimasi akan menghasilkan fraksi massa dari karbon tetap (FC), bahan dapat menguap (VM), kebasahan (M), dan abu (A) dalam batubara. Analisis dilakukan dengan mengambil sejumlah kecil sampel. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 110 °C selama 20 menit. Sampel kemudian ditimbang kembali dan kehilangan massa dibagi dengan massa mula-mula akan menghasilkan fraksi massa kebasahan sampel. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 954 °C dalam sebuah tabung tertutup selama 7 menit, dan sesudah itu kembali ditimbang. Massa yang hilang dibagi dengan massa semula merupakan fraksi massa bahan yang dapat menguap. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 732 °C dalam sebuah cawan peleburan hingga ia terbakar sempurna. Sisanya kemudian ditimbang dan berat terakhir ini dibagi dengan berat semula menghasilkan fraksi abu. Fraksi massa dari karbon tetap diperoleh dengan cara mengurangkan fraksi kebasahan, bahan dapat menguap, dan abu dari kesatuan. Sebagai tambahan terhadap FC, VM, M dan A, kebanyakan analisis proksimasi juga memuat massa sulfur (S) dan nilai pembakaran tinggi (HHV) batubara.

Analisis ultimasi batubara adalah analisis laboratorium yang mencari fraksi massa karbon (C), hidrogen (H₂), oksigen (O₂), sulfur (S), dan nitrogen (N₂) di dalam batubara sekaligus dengan nilai pembakaran tinggi (HHV)nya. Analisis ultimasi diperlukan untuk

menentukan kebutuhan udara pembakaran untuk suatu sistem tertentu, misalnya menentukan aliran udara pada dapur pembakaran.

Jika kadar abu dan kebasahan dapat dihitung, fraksi massa yang lain dan nilai pembakaran tinggi batubara dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\text{Fraksi massa begitu terbakar} = (\text{fraksi massa bebas abu, kering})(1 - M - A)$$

$$\text{Nilai pembakaran tinggi begitu terbakar} = (\text{HHV bebas abu, kering})(1 - M - A)$$

Sifat-Sifat Batubara

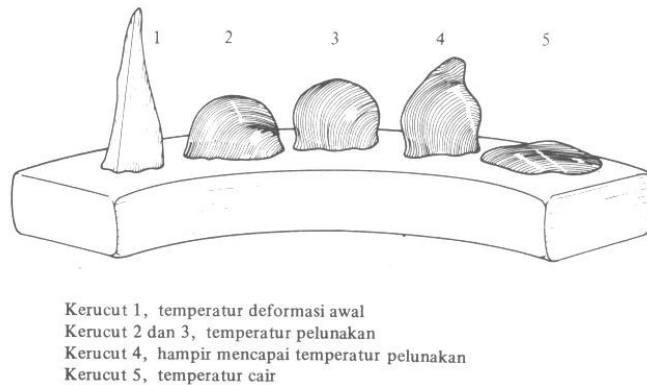
Sifat-sifat batubara yang harus diperhatikan dalam memilih batubara untuk kegunaan tertentu adalah: kadar sulfur, karakteristik pembakaran, daya tahan terhadap cuaca, temperatur pelunakan abu, kemampuan untuk digerinda serta kandungan energi batubara tersebut.

Hal yang paling penting diperhatikan adalah kadar sulfur. Apabila sulfur di dalam batubara terbakar akan menghasilkan sulfur dioksida (SO_2) yang merupakan polusi bagi udara. Konsekuensinya, penting sekali diusahakan agar batubara mempunyai kadar sulfur yang rendah, paling tinggi satu persen atau kurang.

Pada waktu memilih batubara untuk suatu sistem pembakaran tertentu, seseorang haruslah memperhatikan bagaimana batubara itu akan dibakar. Bila batubara dibakar di tempat yang stasioner dengan pergerakan kecil, batubara haruslah dapat terbakar bebas, bukan batubara gemuk. Batubara yang dapat terbakar bebas cenderung untuk pecah berserak pada saat terbakar sehingga mengakibatkan batubara yang belum terbakar terbuka ke udara pembakaran. Ini bisa membantu mencapai pembakaran sempurna. Batubara gemuk menghasilkan massa batubara yang memfusi ketika terbakar sehingga banyak karbon tetap yang tak terbakar. Jenis ini umumnya digunakan untuk memproduksi kokas (coke) dan untuk membakarnya secara efektif, bed batubara haruslah digoyang agar batubara bisa pecah.

Sifat penting lain yang harus diperhatikan adalah indeks dapat digerindanya. Hal ini khususnya untuk sistem-sistem pembangkit tenaga yang menggunakan serbuk batubara dimana batubara digerinda menjadi serbuk halus. Makin tinggi indeks gerinda berarti makin mudah digerinda.

Temperatur pelunakan abu adalah temperatur dimana abu menjadi sangat plastis, beberapa derajat dibawah titik lebur abu. Temperatur ini ditentukan dengan cara memanaskan kerucut-kerucut abu seperti yang terlihat gambar 3.



Gambar 3. Fusibilitas dari kerucut batubara dalam menentukan temperatur abu.

Beberapa dapur pembakaran mengeluarkan abu dari kotak api dalam bentuk terak cair. Batubara dengan temperatur pelunakan abu yang rendah diperlukan untuk sistem-sistem ini. Batubara dengan temperatur pelunakan abu yang tinggi diperlukan untuk sistem yang menangani abu dalam bentuk padat.

Kadar energi atau nilai pembakaran batubara adalah jumlah energi kimia yang terdapat dalam suatu massa atau volume bahan bakar batubara. Ada dua macam nilai pembakaran yaitu nilai pembakaran tinggi atau bruto dan nilai pembakaran rendah atau netto. Perbedaan antara kedua nilai tersebut pada dasarnya adalah sama dengan panas laten penguapan dari uap air yang terdapat dalam hasil gas buang ketika bahan bakar dibakar dengan udara kering. Perbedaan antara nilai pembakaran tinggi dan rendah dihitung dengan cara pendekatan berdasarkan rumus berikut :

$$\text{HHV} - \text{LHV} = 2400(\text{M} + 9\text{H}_2) \quad \text{kJ/kg}$$

dengan : M dan H_2 adalah kebasahan dan fraksi massa hidrogen bahan bakar.

Untuk batubara dengan grade yang lebih baik, nilai pembakaran tingginya dapat ditaksir dengan menggunakan analisis ultimasi dan memakai rumus Dulong:

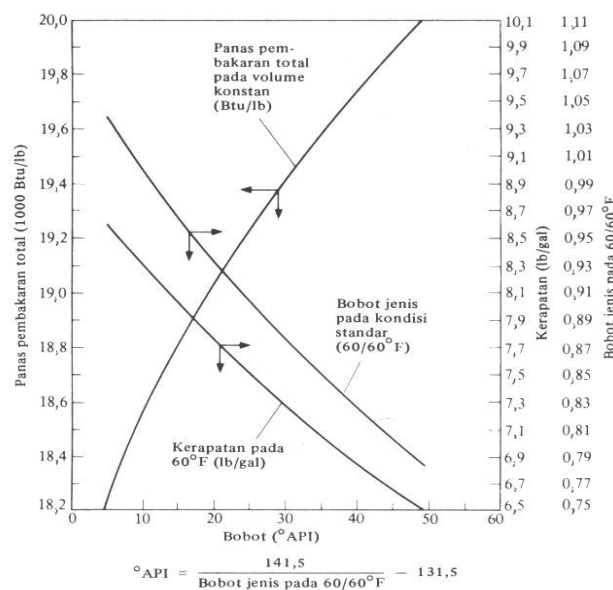
$$\text{HHV} = 33.950\text{C} + 144.200(\text{H}_2 - (\text{O}_2/8)) + 9400\text{S} \quad \text{kJ/kg}$$

Semua harga pada persamaan di atas adalah fraksi massa dan nilai pembakaran tinggi yang dihasilkan adalah untuk basis yang sama.

Minyak Bumi

Minyak bumi (petroleum) dianggap berasal dari kehidupan laut yang membusuk sebagian. Minyak bumi atau minyak mentah adalah komposisi dari berbagai senyawa organik. Analisis ultimasi semua minyak mentah adalah agak konstan. Fraksi massa karbon berkisar antara 84% hingga 87%, fraksi massa hidrogen berkisar antara 11% hingga 16%, jumlah fraksi oksigen dan nitrogen berkisar antara 0 hingga 7%, dan fraksi massa sulfur berkisar antara 0 hingga 4%.

Sifat-sifat yang penting dari minyak bumi serta turunannya adalah nilai pembakaran, berat atau bobot jenis, titik nyala dan titik lumernya. Nilai pembakaran, biasanya nilai pembakaran tinggi, diperlihatkan pada gambar 4.



Gambar 4. Sifat-sifat turunan minyak bumi.

Bobot jenis suatu cairan adalah kerapatan cairan tersebut dibagi dengan kerapatan air pada 60 °F. Bobot minyak bumi dinyatakan dalam satuan °Be atau °API. Hubungan antara bobot jenis s dan satuan ini adalah:

$$\text{Bobot jenis} = s = \frac{140}{130 + ^{\circ}\text{Be}}$$

$$\text{Bobot jenis} = s = \frac{140}{130 + ^{\circ}\text{API}}$$

Titik nyala dari bahan bakar adalah temperatur minimum cairan pada waktu uap yang keluar dari permukaan cairan langsung akan menyala. Dan titik lumer adalah temperatur terendah dimana minyak akan mengalir dibawah kondisi standar.

Minyak mempunyai banyak kelebihan bila dibandingkan dengan batubara bila ia dibakar. Minyak lebih bersih dan mudah untuk ditangani, disimpan dan diangkut. Minyak lebih mudah dibakar dan mempunyai sedikit abu. Unsur yang menimbulkan persoalan pada minyak adalah *vanadium*. Vanadium beroksidasi pada waktu pembakaran menjadi vanadium pentaoksida (VO_5) dan senyawa ini akan mengakibatkan korosi yang cepat pada bahan besi.

Bahan Bakar Gas

Hampir semua bahan bakar gas adalah bahan bakar fosil ataupun hasil sampingan dari bahan bakar fosil. Bahan bakar ini dapat dibagi atas 3 kelompok besar yaitu gas alam, gas pabrik dan gas hasil sampingan.

Komposisi bahan bakar gas umumnya dinyatakan dalam bentuk fraksi mol atau volume dari komponen gas itu sendiri. Analisis juga dapat dilakukan dalam bentuk fraksi massa elemental.

Nilai pembakaran volumetrik suatu campuran bahan bakar gas adalah sama dengan jumlah dari perkalian volume atau fraksi mol komponen individual dengan nilai pembakaran volumetrik komponen yang bersangkutan. Bila nilai pembakaran volumetrik dari suatu komponen gas pada suatu temperatur referensi, T_r , dan tekanan referensi, P_r , diketahui, nilai pembakaran volumetrik dari campuran gas, HHV_v , diperoleh dari persamaan :

$$(HHV_v \text{ campuran})_{P_r, T_r} = \sum_i (HHV_{v,i})_{P_r, T_r} (V_i)$$

dimana $HHV_{v,i}$ dan V_i adalah nilai pembakaran tinggi volumetrik dari fraksi volumetrik gas yang ke- i . Persamaan berikut dapat dipakai untuk mengkonversi nilai pembakaran tinggi volumetrik pada tekanan dan temperatur referensi tertentu ke tekanan dan temperatur lain :

$$(HHV_v)_{P,T} = (HHV_v)_{P_r, T_r} \frac{P_r T}{P T_r}$$

Tekanan dan temperatur dalam persamaan di atas harus dalam nilai absolut.

Nilai pembakaran volumetrik HHV_v pada suatu tekanan P dan temperatur T dapat dikonversi menjadi nilai pembakaran gravimetrik HHV_m dengan mengalikan nilai volumetrik tersebut dengan volume jenis v dari gas pada tekanan dan temperatur yang sama:

$$HHV_m = (HHV_v)_{P,T}(v)_{P,T}$$

Volume jenis suatu campuran gas dapat dihitung dari berat molekular gas tersebut (MW) dan persamaan keadaan gas ideal, seperti berikut:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{RT}{P} = \frac{R_u T}{P(MW)}$$

dimana R_u = konstanta gas universal.

Gas alam adalah satu-satunya bahan bakar fosil gas yang sebenarnya dan biasanya terperangkap dalam lapisan batu kapur (limestone) di atas reservoir minyak bumi. Tekanan reservoir berkisar antara 350 - 700 bar. Gas alam terutama dari metana dengan sedikit fraksi gas-gas lain.

Gas alam mempunyai nilai pembakaran gravimetrik yang tinggi sekitar 55.800 kJ/kg. Nilai pembakaran volumetrik gas alam adalah sekitar 37.000 kJ/m³ pada 1 atm dan 20 °C. Diantara ketiga kelas utama bahan bakar fosil, gas alam mempunyai cadangan dalam bumi yang paling sedikit.

Gas alam mempunyai beberapa kelebihan terhadap bahan bakar lainnya dimana lebih mudah terbakar dan bercampur dengan udara dengan baik, pembakaran bersih dengan sedikit abu. Gas alam dapat diangkut dengan mudah dan murah melalui saluran pipa dan gas bisa dikonversi menjadi gas alam cair (liquified natural gas, LNG) pada -127 °C atau dikompresi (CNG=Compressed Natural Gas).

Gas pabrik ada beberapa jenis, diantaranya adalah *liquified petroleum gas* (LPG), gas air, gas air karburasi, gas alam pengganti atau sintetis dan gas produser.

Gas LPG terdiri dari distilasi ringan dari minyak bumi, terutama propana dan butana. Oleh karena berat molekular serta kerapatan lebih tinggi pada gas ini, ia mempunyai nilai pembakaran volumetrik yang lebih tinggi dari gas alam lain. Bahan bakar gas ini

diangkut dan disimpan dengan tekanan yang berkisar antara 4 hingga 20 bar, tergantung tekanan atmosfer.

Gas air adalah suatu bahan bakar gas pabrik yang diproduksi dengan cara mengalirkan uap dan udara bergantian melalui suatu lapisan kokas pijar. Uap bereaksi dengan kokas panas dan menghasilkan hidrogen dan karbon monoksida. Jika ditambahkan minyak ke atas gas air tersebut maka nilai pembakarannya naik dan gas yang dihasilkan disebut gas air karburasi.

Gas alam sintesis atau gas alam substitusi atau disingkat SNG (*synthetic natural gas*), adalah gas dari proses konversi dari batubara. Konversi ini memerlukan tambahan hidrogen ke batubara. Dalam proses hidrogenisasi, hidrogen yang dimampatkan pada 900 °C direaksikan dengan batubara untuk memperoleh sejumlah senyawa hidrokarbon ringan khususnya metana. Pada tabel 2 terlihat beberapa proses konversi batubara menjadi SNG.

Tabel 2. Karakteristik proses-proses batubara menjadi SNG.

Proses	Jenis proses †	Parameter reaktor kimia		Status
		Temp. °C	Tekanan, bars abs	
Koppers-Totzek	G	1480-1820	1+	Komersial
Wellman-Galusha	G	540-650	1+	Komersial
Winkler	G	820-1010	1+	Komersial
Texaco	G	1480-1820	70	Pabrik perintis
Penggumpalan abu	G	870-980	16	Pabrik perintis
COGAS	G	870-930	1+	Pabrik perintis
Lurgi	G/HD	620-870	30	Komersial
Hygas	G/H	650-980	75	Pabrik perintis
Akseptor CO ₂	G/HD	860-1040	10	Pabrik perintis
BI-GAS	G/HD	1650-930	70	Pabrik perintis
Synthane	G/H	980	70	Pabrik perintis

† G—proses gasifikasi; H—proses hidrogasifikasi; HD—proses hidrodevolatilisasi. Pada proses gasifikasi, batubara direaksikan dengan uap untuk memperoleh suatu gas yang berikutnya dapat dikonversi menjadi metana. Pada proses hidrogasifikasi, hidrogen bertekanan tinggi ditambahkan ke batubara untuk mendapatkan gas metana secara langsung.

Gas produser adalah bahan bakar gas yang terbentuk dengan cara membakar lapisan batubara grade rendah di dalam tanah atau "in-situ" dengan udara yang cukup agar terjadi pembakaran sempurna. Lapisan akan bersuhu tinggi sehingga hidrogen dilepaskan dan sebagian karbon beroksidasi membentuk karbon monoksida.

Gas dapur tinggi adalah bahan bakar kualitas rendah yang merupakan produk samping dari industri baja. Ia dihasilkan dengan membakar batubara dengan udara yang cukup. Gas buang yang diperoleh dipakai untuk memberikan pengurangan atmosfer pada logam yang lumer untuk mencegah terjadinya oksidasi. Komposisi gas dapur tinggi terutama adalah nitrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Komponen yang dapat terbakar dari gas ini hanyalah karbon monoksida.

Contoh Soal

1. Hitunglah analisis ultimasi dan proksimasi dengan basis begitu diterima, taksiran nilai pembakaran rendah dari nilai pembakaran tinggi yang tercantum didaftar, nilai pembakaran tinggi yang dihitung dengan rumus Dulong, dan tentukan klasifikasi ASTM (kelas dan kelompok) dari batubara Stark County, North Dakota, dengan $A = 8$ dan $M = 39\%$.

Data-data

Analisis batubara proksimasi bebas abu, kering :

$$VM = 54,0 \%$$

$$FC = 46,0 \%$$

$$HHV = 28.922 \text{ kJ/kg} = 12.435 \text{ Btu/lbm}$$

$$C = 72,4 \%; H_2 = 4,7 \%; O_2 = 18,6 \%; N_2 = 1,5 \%; S = 2,8 \%$$

Jawab

Ditentukan : batubara Stark County dengan $M = 39$ persen dan $A = 8$ persen.

Untuk mengkonversi ke suatu basis batubara begitu diterima, faktor koreksi atau pelipatan $(1 - M - A) = (1,00 - 0,39 - 0,08) = 0,53$. Analisis proksimasi begitu diterima menjadi :

$$VM = 0,53 \times 54,0 = 28,62\%$$

$$S = 0,53 \times 2,8 = 1,48\%$$

$$FC = 0,53 \times 46,0 = 24,38\%$$

$$M = 39,00\% \quad HHV = 0,53 \times 28.922 = 15.329 \text{ kJ/kg}$$

$$A = 8,00\% \quad = 0,53 \times 12.435 = 6.591 \text{ Btu/lbm}$$

100,00%

Analisis begitu diterima menjadi

$$C = 0,53 \times 72,4 = 38,37\%$$

$$H_2 = 0,53 \times 4,7 = 2,49\% \quad HHV = 15.329 \text{ kJ/kg}$$

$$O_2 = 0,53 \times 18,6 = 9,86\% \quad = 6.591 \text{ Btu/lbm}$$

$$N_2 = 0,53 \times 1,5 = 0,80\%$$

$$S = 0,53 \times 2,8 = 1,48\%$$

$$\begin{aligned}
 M &= 39,00\% \\
 A &= 8,00\% \\
 &100,00\%
 \end{aligned}$$

Nilai pembakaran rendah :

$$\begin{aligned}
 \text{LHV} &= \text{HHV} - 2400(M + 9H_2) = 15.329 - 2400 (0,39 + 9 \times 0,0249) \\
 &= 13.855 \text{ kJ/kg} = 5957 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Harga taksiran dari nilai pembakaran tinggi yang dicari berdasarkan rumus Dulong :

$$\begin{aligned}
 \text{HHV} &= 33.950C + 144.200 (H_2 - O_2/8) + 9400S \\
 &= 33.950 (0,3837) + 144.200 (0,0249 - 0,0986/8) + 9400 (0,0148) \\
 &= 14.979 \text{ kJ/kg} = 6440 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Klasifikasi batubara berdasarkan metode ASTM:

$$\begin{aligned}
 \text{FC, bebas-Mm, kering} &= \frac{100 (\text{FC} - 0,15S)}{100 - M - 1,08A - 0,55S} \\
 &= \frac{100 (24,38 - 0,15 \times 1,48)}{100 - 39,0 - 1,08 \times 8,0 - 0,55 \times 1,48} \\
 &= 46,87\%
 \end{aligned}$$

Oleh karena harga ini lebih kecil dari 69 persen, batubara tidak dapat dimasukkan ke dalam kelas karbon tetap yang bebas bahan mineral, kering.

$$\begin{aligned}
 \text{Btu, bebas-Mm, basah} &= \frac{100 (\text{Btu} - 50S)}{100 - 1,08A - 0,55S} \\
 &= \frac{100 (6591 - 50 \times 1,48)}{100 - 1,08 \times 8,0 - 0,55 \times 1,48} \\
 &= 7197 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Oleh karena harga nilai pembakaran tinggi bebas bahan mineral adalah antara 6300 dan 8300 Btu/lbm, maka batubara ini digolongkan ke dalam kelas IV, kelompok 1 batubara-lignite A.

2. Hitunglah nilai pembakaran tinggi (kilojoule per meter kubik dan kilojoule per kilogram) pada 10 °C dan 3 atm untuk suatu campuran gas dengan komposisi sebagai berikut : 94,3% CH₄, 4,2% C₂H₆ dan 1,5% CO₂. Diketahui fraksi mol dari komponen gas pada 20 °C dan 1 atm :

$$(\text{HHV}_v)_{\text{CH}_4} = 37.204 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{HHV}_v)_{\text{C}_2\text{H}_6} = 65.782 \text{ kJ/m}^3$$

$$(\text{HHV}_v)_{\text{CO}_2} = 0$$

Jawab

- Berat molekul campuran gas = $0,943(16) + 0,042(30) + 0,015(44)$
= 17,01 kg/kg.mol

- Pada 20 °C dan 1 atm:

$$\begin{aligned} (\text{HHV}_v)_{\text{campuran}} &= 0,943(\text{HHV}_v)_{\text{CH}_4} + 0,042(\text{HHV}_v)_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0,015(\text{HHV}_v)_{\text{CO}_2} \\ &= 0,943(37.204) + 0,042(65.782) = 37.846 \text{ kJ/m}^3 \text{ mol} \end{aligned}$$

- Pada 10 °C dan 3 atm:

$$\begin{aligned} (\text{HHV}_v)_{10\text{C}, 3\text{atm}} &= 37.846 P/P_r \times T_r/T = 37.846 (3/1) (293/283) \\ &= 117.550 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

- Volume jenis campuran gas = $v = R_u T / (P(MW))$

$$\text{dimana: } P = 3 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar/atm} (3 \text{ atm}) = 3,039 \text{ bar}$$

$$T = 10 + 273 = 283 \text{ K}$$

$$R_u = 0,08314 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{mol})(\text{K})$$

$$v = (0,08314) \times 283 / (3,039 \times 17,01)$$

$$= 0,4552 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{HHV}_m = v(\text{HHV}_v) = 0,4552 \times 117,544$$

$$= 53.506 \text{ kJ/kg}$$

$$= 23.008 \text{ Btu/lbm}$$

Soal-soal

1. Sebuah pembangkit daya berkapasitas 2400 MW_e mempunyai kebutuhan daya untuk suatu hari tertentu sebagai berikut:

00.00 - 05.00 : 850 MW_e 09.00 - 12.00 : 2150 MW_e

05.00 - 07.00 : 1250 MW_e 12.00 - 13.00 : 2040 MW_e

07.00 - 08.00 : 1840 MW_e 13.00 - 16.00 : 2350 MW_e

08.00 - 09.00 : 1960 MW_e 16.00 - 17.00 : 2400 MW_e

17.00 - 18.00 : 2250 MW_e

18.00 - 20.00 : 1850 MW_e

20.00 - 22.00 : 1500 MW_e

22.00 - 24.00 : 1150 MW_e

Hitunglah keluaran energi total, dalam MW_e*hari, kW_e*jam, MeV, J dan Btu_e. Anggaplah pembangkit tersebut membakar batubara dengan nilai pembakaran (kandungan energi) 29.310 kJ/kg (12.600 Btu/lbm) dengan efisiensi termis keseluruhan adalah 37 persen, dan hitunglah massa total batubara, dalam ton, yang dikonsumsi selama hari operasi tersebut dan laju pemakaian batubara maksimum, dalam ton per jam, yang diperlukan agar pembangkit beroperasi secara sempurna. Hitung laju panas unit tersebut, dalam Btu per kilowatt jam (Btu_{th}/kW_e*jam), dan carilah faktor beban sistem selama masa operasi tersebut. Faktor beban didefinisikan sebagai perbandingan antara keluaran energi rata-rata dan maksimum.

2. Suatu sampel batubara 14 kg, begitu diterima, beratnya 13,4 kg setelah pengeringan udara. Ketika pengeringan dengan oven, sebuah sampel 24 g batubara dengan pengeringan udara itu menyusut beratnya menjadi 2,34 g. Hitunglah persentase kebasahan total dalam batubara pada saat begitu diterima.
3. Sebuah sampel 1,2 g batubara pengeringan udara dari soal 2 dibakar dalam sebuah bom kalorimeter oksigen. Kenaikan temperatur dari 2000 g air serta logam kalorimeter adalah 3,62 °C, diantaranya 0,20 °C adalah akibat kawat sekering (fuse wire) dan pembentukan asam. Setara air dari bagian logam kalorimeter tersebut adalah 450 g. Tentukanlah nilai pembakaran tinggi batubara begitu diterima, dalam kJ/kg dan dalam Btu/lbm.
4. Suatu bahan bakar minyak mempunyai gravitasi jenis API sebesar 32 derajat pada 20 °C. Hitunglah energi minyak tersebut dalam British thermal unit per gallon, serta nilai pembakaran tingginya dalam kilojoule per kilogram. Hitunglah besaran-besaran yang sama pada 60 °C, jika $\rho_T = \rho_{20} [1 - 0,000733(T - 20)]$, dimana T dalam derajat Celsius.
5. Suatu tangki penyimpanan gas yang mempunyai volume 25.000 ft³ berisi gas dengan tekanan 2 bar dan temperatur 10 °C. Nilai pembakaran tinggi gas itu adalah 22.100 kJ/m³ pada 20 °C dan 1 bar. Hitunglah jumlah "therms" dalam tangki penyimpanan gas tersebut.

6. Hitunglah nilai pembakaran tinggi gas alam Missouri dalam satuan kilojoule per kilogram dan dalam British thermal unit per kaki kubik, jika gas tersebut disuplai dengan tekanan 2,5 bar dan temperatur 15 °C. Hitunglah volume gas dalam kaki kubik yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1.000 therm energi. Juga hitunglah fraksi massa dari setiap elemen dalam gas itu.

Data-data gas Missouri :

- Nilai pembakaran : 35,31 kJ/l
- CH₄ : 84,1 % vol.
- C₂H₆ : 6,7 % vol.
- N₂ : 8,4 % vol.
- CO₂ : 0,8 % vol.

BAB III

KETEL UAP (STEAM BOILER)

Sebuah ketel uap biasanya merupakan bejana tertutup yang terbuat dari baja. Fungsinya adalah memindahkan panas yang dihasilkan pembakaran bahan bakar ke air yang pada akhirnya akan menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan bisa dimanfaatkan untuk:

1. Mesin pembakaran luar seperti: mesin uap dan turbin.
2. Suplai tekanan rendah bagi kerja proses di industri seperti industri pemintalan, pabrik gula dsb.
3. Menghasilkan air panas, dimana bisa digunakan untuk instalasi pemanas bertekanan rendah.
4. Dll.

Istilah-istilah penting pada ketel uap

1. Kulit ketel. (boiler shell)

Dibuat dari pelat baja yang dilengkungkan membentuk silinder dan di keling atau dilas. Kulit ketel harus mempunyai kapasitas yang cukup bagi air dan uap.

2. Ruang bakar.

Adalah ruang, umumnya dibawah kulit boiler, tempat membakar bahan bakar yang akan digunakan untuk memanaskan air.

3. Panggangan.

Adalah sebuah pelat datar di dalam ruang bakar, dimana bahan bakar (batubara atau kayu) dibakar. Panggangan biasanya terdiri dari batang besi cor yang berjarak diantaranya supaya udara untuk pembakaran bisa melewatinya.

4. Tungku.

Adalah ruang diatas panggangan dan di bawah kulit ketel. Tungku biasa disebut juga kotak api (firebox).

5. Permukaan pemanas.

Adalah bagian dari permukaan ketel, dimana terkena langsung ke api (atau gas panas dari api).

6. Mounting.

Adalah semua *fitting* yang dipasang pada ketel supaya bisa beroperasi dengan benar. Fitting ini diantaranya adalah : indikator ketinggian, pengukur tekanan, katup pengaman dsb.

7. Asesoris.

Adalah piranti-piranti yang merupakan bagian integral dari ketel namun tidak langsung terpasang pada bodi ketel. Yang termasuk asesoris antara lain: *superheater* (pemanas lanjut), ekonomiser, pompa umpan dsb.

Esensi Ketel Uap Yang Baik

Berikut ini adalah esensi dari ketel uap yang baik.

1. Harus menghasilkan kuantitas maksimum uap dengan bahan bakar yang diberikan.
2. Harus ekonomis ketika dipasang, dan menghendaki sedikit perhatian ketika beroperasi.
3. Harus secara cepat bisa memenuhi beban yang berfluktuasi.
4. Harus bisa distarter dengan cepat.
5. Bobotnya harus ringan.
6. Harus menempati ruang yang kecil.
7. Sambungan harus sesedikit mungkin dan bisa dinspeksi.
8. Lumpur atau endapan lainnya tidak boleh mengumpul pada pelat pemanas.
9. Tube tidak boleh mengakumulasi jelaga atau kotoran air, dan harus mempunyai toleransi ketebalan untuk keausan dan korosi.
10. Rangkaian air dan gas asap harus didesain supaya bisa memberikan kecepatan fluida maksimum tanpa mengakibatkan kerugian gesek yang besar.

Pemilihan Ketel Uap

Pemilihan jenis dan ukuran ketel uap tergantung pada faktor-faktor berikut:

1. Daya yang diperlukan dan tekanan kerja.
2. Posisi geografi dari *power house* (sumber tenaga).
3. Ketersediaan bahan bakar dan air.
4. Kemungkinan stasiun permanen.
5. Faktor beban yang mungkin.

Klasifikasi Ketel Uap

Ada banyak klasifikasi ketel uap, berikut ini diberikan beberapa klasifikasi ketel uap yang penting.

1. Berdasarkan isi tube/pipa.

(a) Pipa api atau pipa asap, dan (b) pipa air.

Pada ketel pipa api, nyala api dan gas panas yang dihasilkan pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut. Contoh ketel uap pipa air sederhana: ketel vertikal sederhana, ketel Cochran, ketel Lanchashire, ketel Cornish, ketel Scotch marine, ketel lokomotif dan ketel Velcon.

Pada ketel pipa air, air dimasukkan ke dalam pipa dimana pipa dikelilingi oleh nyala api dan gas panas dari luar. Contoh ketel jenis ini : ketel Babcock dan Wilcox, ketel Stirling, ketel La-Mont, ketel Benson, ketel Yarrow dan ketel Loeffler.

2. Berdasarkan posisi dapur pembakar.

(a) Dibakar di dalam, dan (b) dibakar di luar.

Pada ketel uap dibakar di dalam, dapur diletakkan di dalam kulit boiler. Sebagaimana besar ketel pipa api mempunyai jenis ini.

Pada ketel uap dibakar di luar, dapur disusun dibawah susunan bata. Ketel pipa air selalu dibakar di luar.

3. Berdasarkan sumbu shell/kulit.

(a) Vertikal, dan (b) horizontal.

Pada ketel uap vertikal, sumbu shell vertikal, sedangkan pada jenis horisontal, sumbu shellnya horisontal.

4. Berdasarkan jumlah pipa.

(a) Pipa tunggal, dan (b) pipa banyak.

Pada ketel uap pipa tunggal, hanya ada satu buah pipa api atau pipa air. Ketel vertikal sederhana dan ketel Cornish adalah jenis ketel pipa tunggal.

Pada ketel pipa banyak, ada dua atau lebih pipa api atau pipa air.

5. Berdasarkan metode sirkulasi air dan uap.

(a) Sirkulasi alami, dan (b) sirkulasi paksa.

Pada ketel dengan sirkulasi alami, sirkulasi air adalah dengan arus konveksi alami/natural, dimana dihasilkan karena pemanasan air.

Pada ketel uap dengan sirkulasi paksa, ada sirkulasi paksa pada air dengan memakai penggerak pompa. Penggunaan sirkulasi paksa dilakukan pada ketel seperti ketel La-Mont, ketel Benson, ketel Loeffler dan ketel Velcon.

6. Berdasarkan penggunaannya.

(a) Stasioner, dan (b) mobile (bergerak).

Ketel uap stasioner digunakan di pusat pembangkit tenaga, dan di industri proses. Ketel ini disebut stasioner karena ketel tidak berpindah dari satu ke tempat lainnya.

Ketel uap *mobile* (bergerak) adalah ketel yang bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya. Ketel jenis ini seperti ketel lokomotif dan ketel *marine*.

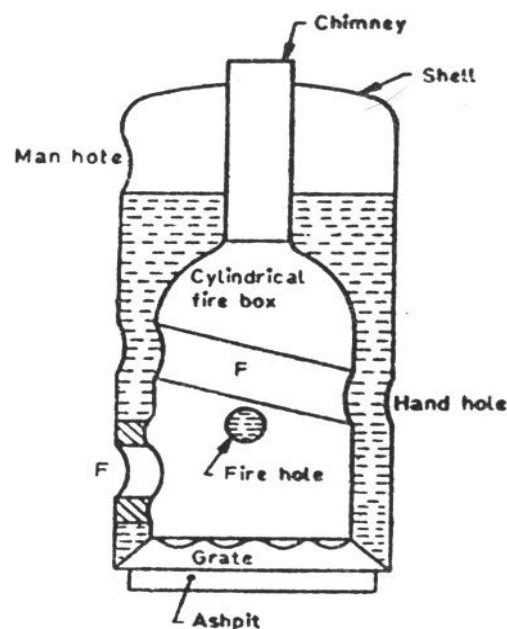
7. Berdasarkan sumber panas.

Sumber panas bisa berupa pembakaran bahan bakar padat, cair atau gas, gas sisa panas yang dihasilkan dari proses kimia, energi listrik atau energi nuklir.

Ketel Uap Vertikal Sederhana

Ketel uap vertikal sederhana menghasilkan uap pada tekanan rendah dan dalam jumlah kecil. Karenanya digunakan pada pembangkit daya rendah atau pada tempat di mana ruang terbatas. Konstruksi ketel jenis ini diperlihatkan oleh gambar 1.

Ketel ini terdiri dari kulit silinder yang mengelilingi kotak api silinder. Kotak api silinder ditap di atasnya tempat mengalirnya uap ke permukaan. Pada dasar kotak api terdapat *grate* (panggangan). Kotak api dilengkapi dengan dua atau lebih pipa melintang miring *F, F*. Kemiringan bertujuan untuk menaikkan permukaan pemanasan disamping juga untuk meningkatkan sirkulasi air. Lubang tangan (*hand hole*) dibuat disamping untuk keperluan pembersihan deposit. Sebuah lubang orang (*man hole*) dibuat di atas untuk supaya orang bisa memasuki ketel untuk pembersihan. Sebuah lobang abu dibuat pada dasar ketel untuk pembuangan abu yang mengendap. Ruang antara kulit boiler dan kotak api diisi dengan air yang akan dipanaskan.



Gambar 1. Ketel vertikal sederhana.

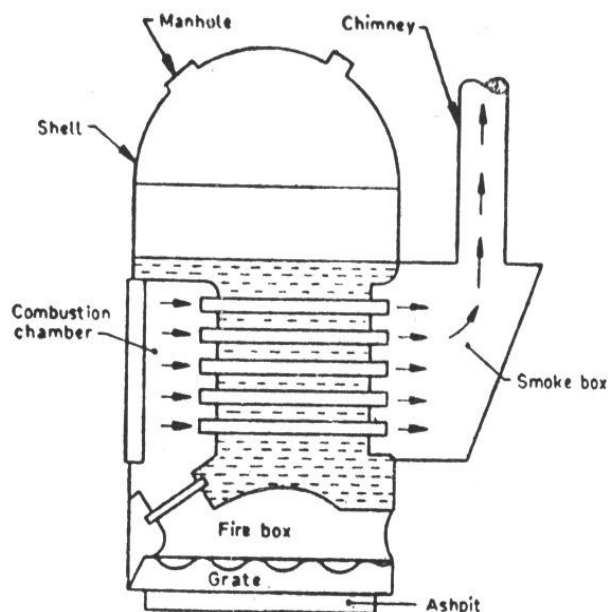
Ketel Uap Cochran atau Ketel Pipa Banyak Vertikal

Ada banyak desain mengenai ketel pipa banyak, ketel Cochran dianggap sebagai salah satu ketel jenis ini yang paling efisien. Ketel Cochran merupakan jenis ketel vertikal sederhana yang telah ditingkatkan.

Ketel terdiri dari kulit silinder eksternal dan kotak api seperti yang diperlihatkan gambar 2. Kulit dan kotak api keduanya berbentuk setengah bola. Mahkota setengah bola pada kulit memberikan ruang maksimum dan kekuatan maksimum untuk menahan

tekanan uap di dalam ketel. Kotak api dan ruang bakar (combustion chamber) dihubungkan melalui pipa pendek. Gas asap dari ruang bakar mengalir ke kotak asap (smoke box) melalui sejumlah pipa asap. Pipa ini umumnya mempunyai diameter luar 62,5 mm dan berjumlah 165 buah. Gas dari kotak asap mengalir ke atmosfer melalui cerobong (chimney). Ruang bakar dilapisi dengan batu tahan api pada sisi kulit. Lobang orang dekat puncak mahkota kulit diperlukan untuk pembersihan.

Pada dasar kotak api terdapat panggangan (dalam hal pembakaran batubara) dan batu bara di umpan melalui lobang api (fire hole). Jika ketel digunakan untuk pembakaran bahan bakar minyak, tidak diperlukan panggangan, tetapi dasar kotak api dilapisi dengan bata tahan api. Pembakar minyak di pasang di lobang api.



Gambar 2. Ketel Cochran.

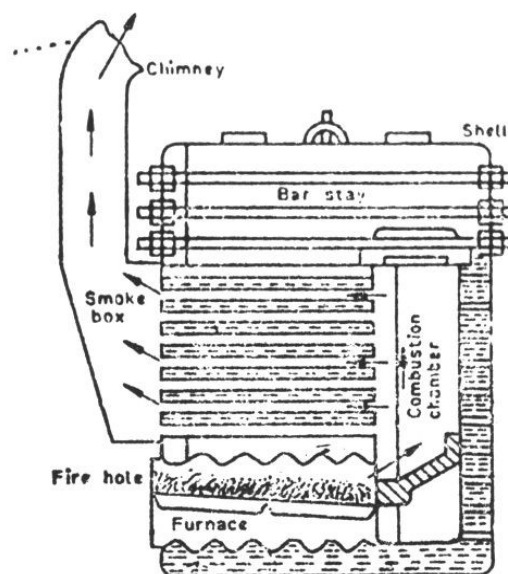
Ketel Scotch Marine

Ketel uap marine (kapal) jenis Scotch atau tangki digunakan untuk kerja di laut karena kekompakannya, efisien dalam operasinya dan kemampuannya untuk menggunakan berbagai jenis air.

Ketel mempunyai drum dengan diameter dari 2,5 hingga 3,5 meter yang ditempatkan secara horisontal. Ketel uap ini bisa berupa ujung tunggal atau ujung ganda. Panjang ketel uap ujung tunggal bisa sampai 3,5 meter, sedangkan ujung ganda bisa sampai 6,5 meter.

Ketel ujung tunggal mempunyai satu sampai empat dapur yang masuk dari sisi depan ketel. Ketel ujung ganda mempunyai dapur pada kedua ujungnya, dan bisa mempunyai dapur dari dua sampai empat pada setiap ujung.

Ketel uap ujung tunggal Scotch marine bisa dilihat pada gambar 3. Setiap dapur mempunyai ruang bakarnya masing-masing. Terdapat pelat datar di setiap ruang bakar yaitu pelat atas, pelat bawah, dua pelat sisi dan pelat tube/pipa. Sejumlah pipa asap ditempatkan secara horisontal dan menghubungkan ruang bakar dengan cerobong. Pipa dapur, pipa asap dan ruang bakar, semuanya dikelilingi oleh air, memberikan luas permukaan pemanasan yang sangat besar. Air bersirkulasi disekeliling pipa asap. Level air dijaga sedikit diatas ruang bakar. Kotak asap (smoke box) dibuat dengan pintu untuk membersihkan pipa dan kotak asap.

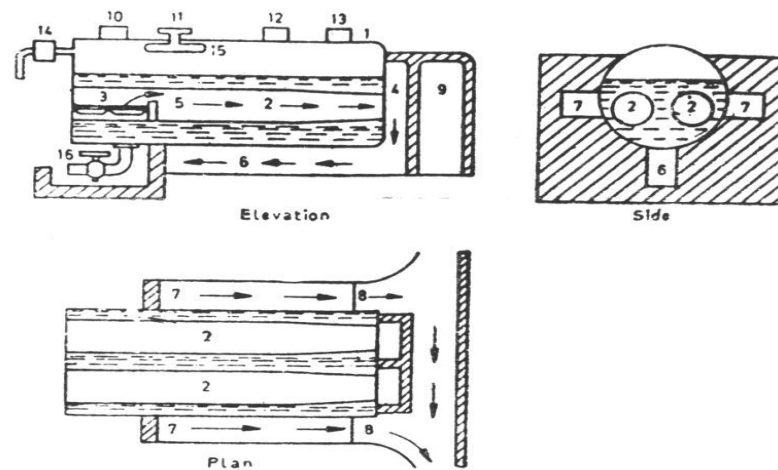


Gambar 3. Ketel Scotch marine.

Ketel Lanchashire

Ketel ini merupakan jenis pipa api stasioner, pembakaran dalam, horisontal dan sirkulasi alami. Digunakan jika tekanan kerja dan daya yang diperlukan menengah. Ketel ini mempunyai diameter kulit silinder 1,75 hingga 2,75 meter. Panjangnya bervariasi dari 7,25 m hingga 9 m. Ketel ini mempunyai dua pipa gas asap internal yang berdiameter kira-kira 0,4 kali dari diameter kulit. Gambar ketel ini bisa dilihat pada gambar 4.

Ketel ini terdiri dari kulit eksternal silinder panjang (1) yang terbuat dari pelat baja. Ketel mempunyai dua pipa api internal besar (2). Pipa ini diameternya mengecil pada bagian belakang untuk akses ke bagian yang lebih rendah pada ketel. Panggangan api (3) yang disebut juga dapur disediakan pada ujung pipa gas asap dimana disini bahan bakar padat dibakar. Pada ujung panggangan terdapat bata (5) yang berfungsi membelokkan gas asap ke atas. Gas asap panas setelah meninggalkan pipa gas asap internal turun ke pipa dasar (6). Gas asap ini bergerak ke depan ketel dimana alirannya terbagi dan mengalir ke lorong api sisi (7). Gas asap memasuki lorong utama (9) dan selanjutnya menuju cerobong.

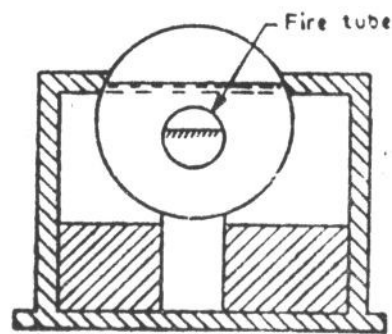


Gambar 4. Pandangan depan, sisi dan atas ketel Lancashire.

Damper (8) berguna untuk mengatur besar aliran gas asap keluar. Katup (11) berfungsi menyuplai uap ke mesin seperti yang dikehendaki. Ketel dilengkapi dengan katup pengaman pegas (10), katup pengaman jika uap tinggi dan air rendah (12). Blow off cock (16) untuk membuang lumpur dsb yang mengendap pada dasar ketel.

Ketel Cornish

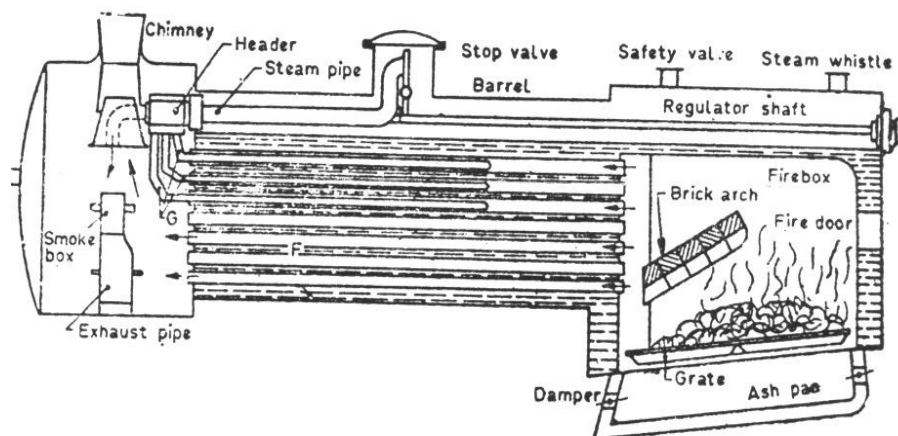
Ketel ini sejenis dengan ketel Lancashire kecuali ia mempunyai hanya satu pipa asap. Diameter ketel Cornish berkisar antara 1 m hingga 2 m dan panjang 5 m hingga 7,5 m. Kapasitas dan tekanan kerja ketel ini adalah rendah jika dibandingkan dengan ketel Lancashire.



Gambar 5. Ketel Cornish.

Ketel Lokomotif

Merupakan jenis ketel mobile dan pembakaran internal, horisontal banyak pipa. Prinsip ketel ini adalah menghasilkan uap dengan laju kecepatan tinggi. Jenis ketel lokomotif moderen diperlihatkan pada gambar 6.



Gambar 6. Ketel Lokomotif.

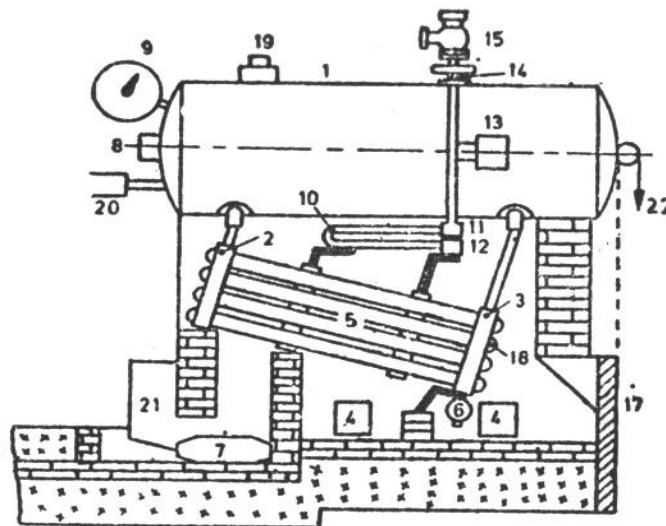
Ketel terdiri dari kulit atau *barrel* yang mempunyai diameter 1,5 m dan panjang 4 m. Batubara diumpan ke dalam kotak api melalui pintu api dan terbakar pada panggangan. Gas asap dari panggangan dibelokkan oleh bata dan keseluruhan kotak api terpanaskan secara baik. Ada sekitar 157 pipa tipis atau pipa api *F* (diameter 47,5 mm) dan 24 buah pipa panas lanjut tebal *G* (diameter 13 cm). Gas asap setelah melewati pipa ini masuk ke kotak asap. Gas kemudian keluar ke atmosfer melewati cerobong. Barrel berisi air disekeliling pipa, dimana dipanaskan oleh gas asap dan berubah menjadi uap.

Header terbagi atas dua porsi, satu adalah ruang uap panas lanjut dan satu lagi ruang uap jenuh. Pipa uap mengarahkan uap dari regulator ke ruang uap jenuh. Kemudian uap diarahkan ke pipa panas lanjut, dan setelah melewati pipa ini, uap kembali ke ruang uap panas lanjut. Uap panas lanjut sekarang mengalir melalui pipa uap ke silinder, satu buah di setiap sisi.

Abu dari panggangan dikumpulkan pada nampan abu (ash pan) dan dibuang dari waktu ke waktu dengan bantuan *dampers* yang dioperasikan oleh batang dan tuas.

Ketel Babcock and Wilcox

Merupakan ketel jenis pipa lurus, stasioner, pipa air. Gambar 7 memperlihatkan ketel jenis ini.



Gambar 7. Ketel Babcock and Wilcox.

Ketel terdiri dari drum uap dan air (1). Drum dihubungkan dengan pipa pendek ke bagian atas *header* atau *riser* (2). Pipa air (5) (diameter 10 cm) dipasang miring dan menghubungkan header atas dengan header bawah. Header dilengkapi dengan lobang tangan (hand hole) di depan pipa dan ditutup dengan *cap* (18).

Kotak lumpur (6) disediakan pada header bagian bawah dan lumpur yang mengendap bisa dibuang. Terdapat panggangan berantai otomatis yang bergerak lambat dimana ditempatkan batubara yang diumpan dari *hopper* (21). *Baffle* bata tahan api akan

membuat gas panas bergerak naik turun dan naik lagi sampai akhirnya masuk ke cerobong. *Damper* (17) digerakkan oleh rantai (22) untuk mengatur isapan.

Ketel di keempat sisinya dikelilingi oleh dinding tahan api. Pintu (4) berguna untuk orang masuk ke ketel untuk tujuan perbaikan dan pembersihan. Air bersirkulasi dari drum (2) ke header (3) dan melalui pipa (5) ke header dan kembali ke drum. Air terus-menerus bersirkulasi seperti ini sampai air menguap. Pemanas lanjut uap (*superheater*) terdiri dari sejumlah besar pipa baja (10) dan berisi dua kotak, satu adalah kotak uap panas lanjut (11) dan satunya lagi kotak uap jenuh(12).

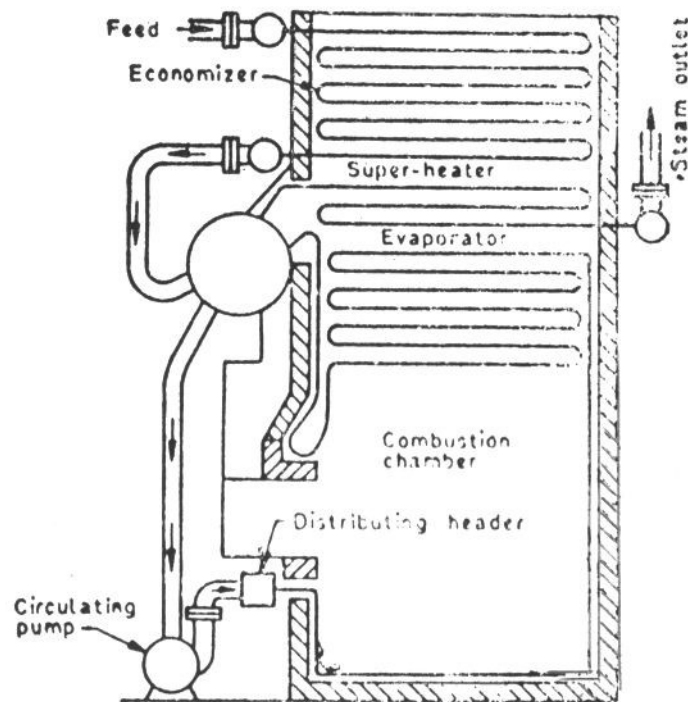
Uap yang dihasilkan diatas level air di drum mengalir di dalam pipa kering dan pipa inlet ke kotak panas lanjut (11). Kemudian uap menuju kotak uap jenuh (12) melalui (10). Uap selama mengalir melalui pipa (10) mendapat panas lanjutan sehingga menjadi uap panas lanjut. Uap kemudian diambil dari ujung pipa (14) melalui katup (15).

Ketel dilengkapi dengan berbagai fitting seperti katup pengaman (19), katup pengumpan (20), indikator ketinggian air (8) dan pengukur tekanan (9).

Ketel La-Mount

Ketel ini adalah ketel moderen jenis tekanan tinggi, pipa air, bekerja dengan sirkulasi paksa. Sirkulasi diatur oleh pompa sentrifugal, digerakkan oleh turbin uap menggunakan uap dari ketel. Sirkulasi paksa menyebabkan berat air umpan (*feed water*) yang bersirkulasi ke seluruh dinding air dan drum sama dengan sepuluh kali berat uap. Ini akan mencegah pipa mendapatkan panas lebih. Skematik diagram ketel ini bisa dilihat pada gambar 8.

Air umpan mengalir melalui ekonomiser ke drum penguap. Kemudian air ditarik dengan pompa ke pipa. Pompa mendorong air ke header pada tekanan diatas tekanan drum. Header mendistribusikan air melalui nosel ke pipa pembangkit yang bekerja secara paralel. Air dan uap dari pipa ini mengalir ke drum. Uap di dalam drum kemudian diambil setelah melewati *superheater*.

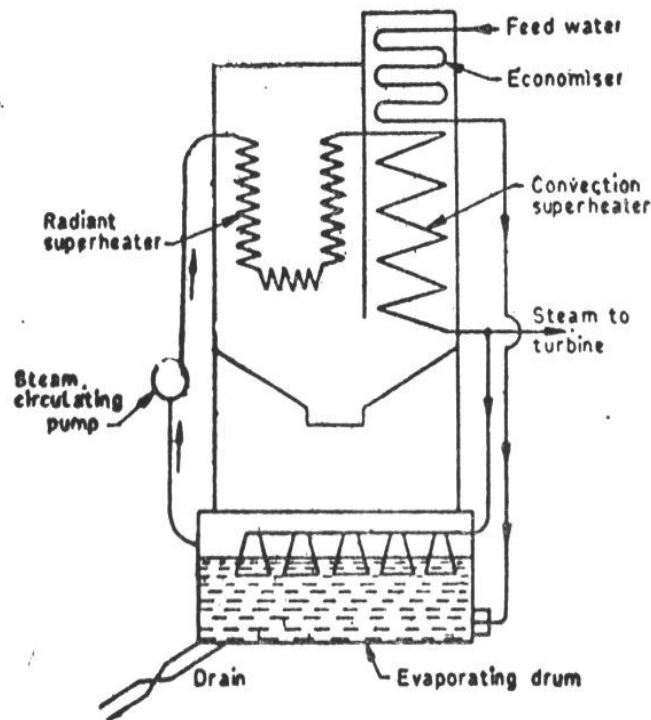


Gambar 8. Ketel La-Mount.

Ketel Loeffler

Ketel ini adalah ketel jenis pipa air menggunakan sirkulasi paksa. Prinsip kerja utama adalah dengan menguapkan air dengan uap panas lanjut dari *superheater*. Gas panas dari dapur pemanas digunakan untuk pemanasan panas lanjut. Skema ketel ini bisa dilihat pada gambar 9.

Air umpan dari ekonomiser dipaksa bercampur dengan uap panas lanjut di dalam drum penguap (*evaporating drum*), sehingga terbentuk uap jenuh, dan kemudian ditarik dari drum dengan pompa sirkulasi uap. Uap ini kemudian mengalir melalui pipa-pipa pada dinding ruang bakar memasuki *superheater*. Dari *superheater*, sekitar sepertiga uap panas lanjut diteruskan ke turbin dan sisanya yang dua pertiga digunakan untuk menguapkan air umpan di drum penguap.



Gambar 9. Ketel Loeffler.

Keuntungan Dan Kerugian Ketel Pipa Air

Keuntungan-keuntungan ketel pipa air:

1. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dari pada ketel pipa api.
2. Untuk daya yang sama, menempati ruang/tempat yang lebih kecil daripada ketel pipa api.
3. Laju aliran uap lebih tinggi.
4. Komponen-komponen yang berbeda bisa diurai sehingga mudah untuk dipindahkan.
5. Permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus.
6. Pecah pada pipa air tidak menimbulkan kerusakan ke seluruh ketel.

Kerugian-kerugian ketel pipa air:

1. Air umpan mensyaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa. Jika terbentuk kerak di dalam pipa bisa menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.
2. Ketel pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati bagi penguapannya, karena itu akan menimbulkan biaya operasi yang lebih tinggi.
3. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.

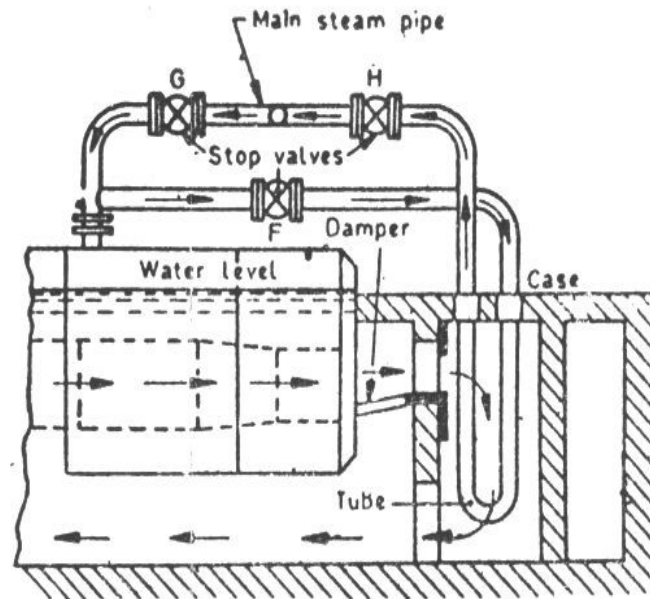
Superheater

Superheater adalah piranti penting pada unit pembangkit uap. Tujuannya adalah untuk meningkatkan temperatur uap jenuh tanpa menaikkan tekanannya. Biasanya piranti ini merupakan bagian integral dari ketel, dan ditempatkan di jalur gas asap panas dari dapur. Gas asap ini digunakan untuk memberikan panas lanjut pada uap. *Superheater Sudgen* yang biasanya terpasang pada ketel Lanchashire diperlihatkan oleh gambar 11. Piranti ini terdiri dari dua kotak baja atau *heater* dimana bergantung padanya sekumpulan pipa lengkung berbentuk U. Ujung dari pipa-pipa ini diteruskan ke *header*.

Uap masuk ke ujung belakang header dan keluar diujung depan header. Panas yang berlebihan pada pipa superheater dicegah dengan menggunakan *dampers* penyeimbang yang dioperasikan dengan handel.

Superheater bekerja jika *dampers* pada posisi yang ditunjukkan gambar. Jika *dampers* pada posisi vertikal, gas akan lewat langsung di dasar tanpa melewati pipa-pipa superheater. Pada kondisi ini maka superheater tidak bekerja.

Perlu dicatat bahwa jika superheater bekerja, katup *G* dan *H* dalam kondisi terbuka dan katup *F* tertutup. Jika uap diambil langsung dari ketel, katup *G* dan *H* tertutup dan katup *F* terbuka.



Gambar 11. Superheater.

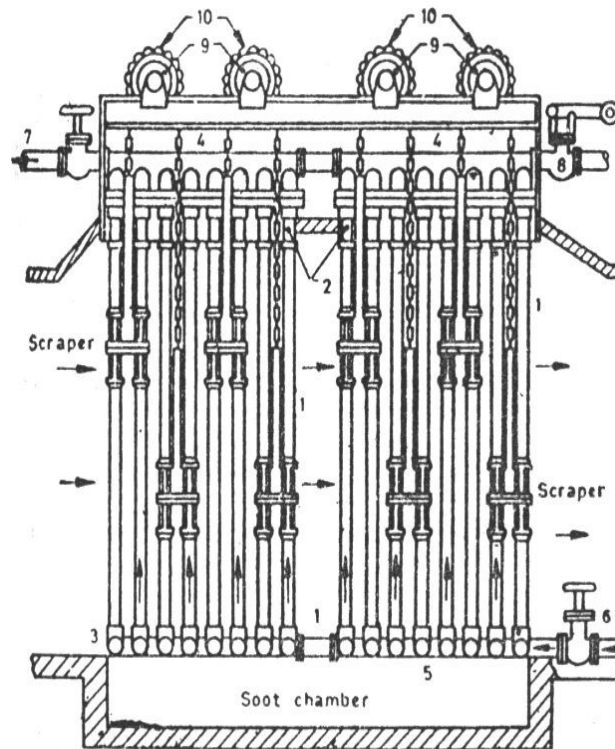
Ekonomiser

Ekonomiser adalah piranti yang digunakan untuk memanaskan air umpan dengan memanfaatkan panas dari gas asap sebelum masuk ke cerobong. Ekonomiser akan meningkatkan nilai ekonomis ketel uap. Jenis ekonomiser yang populer adalah ekonomiser “Greans” dan banyak digunakan pada ketel stasioner. Ekonomiser ini terdiri dari sejumlah besar pipa vertikal yang ditempatkan sebagai penambahan gas asap antara ketel dengan cerobong seperti terlihat pada gambar 12. Pipa-pipa ini mempunyai panjang 2,75 m, diameter luar 11,4 cm dan tebal 11,5 mm dari bahan besi tuang.

Ekonomiser dibuat dalam seksi tegak. Setiap seksi umumnya terdiri dari enam atau delapan pipa vertikal (1). Pipa-pipa ini disambung ke pipa atau kotak horisontal (2) diatas dan (3) dibawah. Kotak atas (2) dari seksi yang berbeda disambung dengan pipa (4), sedangkan kotak bawah disambungkan ke pipa (5).

Air umpan dipompa ke ekonomiser pada (6) dan memasuki pipa (5). Kemudian air masuk ke dalam kotak bawah (3) dan kemudian ke dalam kotak atas (2) melalui pipa (1). Air kemudian diarahkan pipa (4) ke pipa (7) dan kemudian ke ketel.

Perlu dicatat bahwa temperatur air umpan tidak boleh kurang dari 35 °C, jika tidak ada bahaya korosi disebabkan oleh uap air di gas asap mengendap di pipa dingin.



Gambar 12. Ekonomiser.

Berikut ini adalah keuntungan-keuntungan menggunakan ekonomiser:

1. Ada penghematan bahan bakar/batubara 15 sampai 20%.
2. Meningkatkan kapasitas menghasilkan uap karena memperpendek waktu yang diperlukan untuk merubah air ke uap.
3. Mencegah pembentukan kerak di dalam pipa air ketel, sebab kerak sekarang mengendap di pipa ekonomiser yang bisa dengan mudah dibersihkan.
4. Karena air umpan memasuki ketel panas, sehingga regangan karena ekspansi yang tidak sama bisa diminimalkan.

Unjuk Kerja Ketel Uap

1. Penguapan Ekuivalen:

Jika sejumlah air diuapkan dari air umpan pada 100°C dan menghasilkan uap jenuh dan kering pada 100°C dan tekanan atmosfer, biasanya dinyatakan dengan *dari dan pada* 100°C .

Jika air sudah berada pada temperatur didihnya, maka panas yang dibutuhkan air hanyalah panas laten pada tekanan $1,033\text{ kg/cm}^2$ untuk merubahnya ke dalam bentuk uap pada temperatur 100°C . Harga kalor laten ini diambil $539,0\text{ kcal/kg}$. Secara matematik, penguapan ekivalen “dari dan pada 100°C ”:

$$E = \frac{\text{kalor total yang diperlukan untuk menguapkan air}}{539,0}$$

Misalkan t_1 = temperatur air umpan dalam $^{\circ}\text{C}$

h_1 = kalor sensibel/nyata air umpan dalam kcal/kg uap bersesuaian dengan t_1

H = kalor total uap dalam kcal/kg uap pada tekanan kerjanya

= $h_1 + xL$... untuk uap basah

= $h_1 + L$... untuk uap kering

= $h_1 + L + C_p(t_{sup} - t_{sat})$... untuk uap panas lanjut

W_e = berat air yang diuapkan atau jumlah uap yang dihasilkan dalam kg/h atau kg/kg bahan bakar yang dibakar

Kalor yang diperlukan untuk menguapkan 1 kg air:

$$= H - h_1$$

dan
$$E = \frac{W_e [H - h_1]}{539,0}$$

Catatan. 1. Faktor $(H - h_1)/539,0$ disebut juga sebagai faktor penguapan, dan biasanya dilambangkan dengan F_e . Harganya selalu lebih besar dari satu untuk semua ketel uap.

2. Dalam satuan SI, harga kalor laten pada temperatur 100°C adalah $2256,9\text{ kJ/kg}$, sehingga:

$$E = \frac{W_e [H - h_1]}{2256,9}$$

2. Efisiensi Ketel:

Efisiensi adalah rasio panas yang digunakan dalam memproduksi uap terhadap panas yang dihasilkan dapur. Secara matematik:

$$\eta = \frac{\text{Kalor yang digunakan untuk menghasilkan uap}}{\text{kalor yang dihasilkan dapur}}$$

$$\eta = \frac{W_e[H - h_1]}{C}$$

dimana : W_e = berat air sebenarnya menguap atau penguapan sebenarnya dalam kg/kg bahan bakar

C = nilai kalor bahan bakar dalam kcal/kg bahan bakar.

Jika W_s adalah berat air yang diuapkan dalam kg dan W_f adalah berat bahan bakar yang digunakan dalam kg, maka:

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} \quad \text{kg/kg bahan bakar}$$

dan,

$$\eta = \frac{W_s(H - h_1)}{W_f \times C}$$

Catatan: jika ketel terdiri dari ekonomiser dan superheater, dianggap sebagai unit tunggal, kemudian efisiensi adalah efisiensi keseluruhan ketel.

3. Daya Ketel :

American Society of Mechanical Engineers (ASME) menentukan bahwa **satu daya kuda ketel** adalah ekuivalen dengan penguapan 15,653 kg air per jam dari dan pada 100 °C.

Secara matematik:

$$\text{Daya ketel} = \frac{W_e(H - h_1)}{539,0 \times 15,563} \quad \text{hp}$$

dimana, W_e = berat air yang sebenarnya menguap

H = kalor total uap yang dihasilkan

h_1 = Kalor sensibel/nyata air umpan

Contoh Soal

Sebuah ketel uap menguapkan 3,6 kg air per kg bahan bakar batubara menjadi uap jenuh kering pada tekanan 10 kg/cm² absolut. Temperatur air umpan adalah 32^o C. Carilah penguapan ekivalen “dari dan pada 100^o C” dan juga faktor penguapan.

Jawab:

Diketahui:

$W_e = 3,6$ kg/kg batubara

Tekanan uap = 10 kg/cm² absolut

Temperatur air umpan, $t_1 = 32^o$ C

Penguapan ekivalen “dari dan pada 100^o C”

Misalkan E = penguapan ekivalen “dari dan pada 100^o C”

Kalor sensibel/nyata air pada 32^o C (dari tabel uap):

$$h_1 = 32,0 \text{ kcal/kg}$$

Pada tekanan 10 kg/cm² absolut, dari tabel uap diperoleh:

$$H = 663,3 \text{ kcal/kg}$$

Penguapan ekivalen:

$$E = \frac{W_e(H - h_1)}{539,0} = \frac{3,6(663,3 - 32,0)}{539,0} = 4,2 \text{ kg}$$

Faktor penguapan

Misalkan F_e = faktor penguapan

$$F_e = \frac{H - h_1}{539,0} = \frac{663,3 - 32,0}{539,0} = 1,17$$

Contoh soal

Observasi berikut dilakukan pada pembangkit ketel uap selama uji satu jam:

- tekanan uap : 20 bar
- Temperatur uap : 260^o C

- Uap yang dihasilkan : 37.500 kg
- Temperatur air memasuki ekonomiser : 15°C
- Temperatur air meninggalkan ekonomiser : 90°C
- Bahan bakar yang digunakan: 4.400 kg
- Energi pembakaran bahan bakar: 30.000 kJ/kg

Hitunglah:

- a. Penguapan ekivalen per kg bahan bakar
- b. Efisiensi termal pembangkit
- c. Persen energi panas dari bahan bakar yang terpakai oleh ekonomiser.

Jawab:

Diketahui: Tekanan uap = 20 bar

Temperatur uap, $t_{sup} = 260^{\circ}\text{C}$

Berat uap yang dihasilkan, $W_s = 37.500\text{ kg/h}$

Temperatur air memasuki ekonomiser, $t_1 = 15^{\circ}\text{C}$

Dari tabel uap diperoleh kalor sensibel/enthalpi air:

$$h_1 = 62,9\text{ kJ/kg}$$

Temperatur air meninggalkan ekonomiser, $t_2 = 90^{\circ}\text{C}$

Dari tabel uap, kalor sensibel air meninggalkan ekonomiser:

$$h_2 = 376,9\text{ kJ/kg}$$

Berat bahan bakar, $W_f = 4.400\text{ kg/h}$

Energi pembakaran bahan bakar, $C = 30.000\text{ kJ/kg}$

a. *Penguapan ekivalen per kg bahan bakar*

Dari tabel uap, untuk tekanan 20 bar diperoleh:

$$h = 908,6\text{ kJ/kg}; L = 1.886,6\text{ kJ/kg}; t_s = 212,4^{\circ}\text{C}$$

Berat air yang diuapkan:

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} = \frac{37.500}{4.400} = 8,52\text{ kg/kg bahan bakar}$$

dan kalor total dalam 1 kg uap panas lanjut (dengan mengasumsikan $C_p = 2,0$) :

$$H_{sup} = h + L + C_p (t_{sup} - t_s)\text{ kJ/kg}$$

$$= 908,6 + 1.886,6 + 2 (260 - 212,4) \text{ kJ/kg}$$

$$= 2.890,4 \text{ kJ/kg}$$

maka:

$$E = \frac{W_e (H_{sup.} - h_1)}{2.256,9}$$

$$= \frac{8,52(2.890,2 - 62,9)}{2.256,9} = 10,7 \text{ kg}$$

b. Efisiensi termal pembangkit

Misalkan η = efisiensi termal pembangkit

maka:

$$\eta = \frac{W_e (H_{sup.} - h_1)}{C}$$

$$= \frac{8,52(2.890,4 - 62,9)}{30.000} = 0,803$$

$$= 80,3 \%$$

c. Persentase energi panas yang dipakai oleh ekonomiser

Kalor yang dipakai oleh ekonomiser per kg bahan bakar:

$$= W_e (h_2 - h_1) = 8,52 (376,9 - 62,9) \text{ kJ}$$

$$= 2675 \text{ kJ}$$

Persentase kalor yang dipakai ekonomiser:

$$= \frac{2.675}{30.000} = 0,089 = 8,9 \%$$

Contoh soal

Ketel uap Lancashire menghasilkan 2.400 kg uap kering per jam pada tekanan 11 kg/cm² absolut. Luas area panggangan adalah 3 m² dan sebanyak 90 kg batubara dibakar per m² panggangan per jam. Harga nilai kalor batubara adalah 7.900 kcal/kg dan temperatur air umpan adalah 17,5^o C. Carilah : (a) Penguapan aktual per kg batubara, (b) Daya ketel, (c) Efisiensi ketel.

Jawab

Diketahui: berat uap yang dihasilkan, $W_s = 2.400 \text{ kg/h}$

Tekanan uap = 11 kg/cm² absolut

Luas panggangan = 3 m^2

Maka berat batubara yang dibakar:

$$W_f = 3 \times 90 = 270 \text{ kg/h}$$

Nilai kalori bahan bakar, $C = 7.900 \text{ kcal/kg}$ batubara

Temperatur air umpan, $t_1 = 17,5^\circ \text{ C}$

Maka kalor sensibel/enthalpi air umpan pada $17,5^\circ \text{ C}$ adalah (dari tabel uap):

$$h_1 = 17,5 \text{ kcal/kg}$$

a. Penguapan aktual per kg batubara

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} = \frac{2.400}{270} = 8,89 \text{ kg/kg batubara}$$

b. Daya ketel

Dari tabel uap, pada tekanan 11 kg/cm^2 abs, kita dapatkan:

$$H = 664,1 \text{ kcal/kg}$$

Daya ketel:

$$\begin{aligned} &= \frac{W_e(H - h_1)}{539,0 \times 15,563} \\ &= \frac{8,89(664,1 - 17,5)}{539,0 \times 15,563} = 0,69 \text{ hp} \end{aligned}$$

c. Efisiensi ketel

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_e(H - h_1)}{C} \\ &= \frac{8,89(664,1 - 17,5)}{7.900} = 0,728 = 72,8 \text{ \%} \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Apakah yang dimaksud dengan ketel uap? Bagaimana ketel diklasifikasikan?
2. Terangkan prinsip kerja ketel pipa api dan ketel pipa air.
3. Terangkanlah secara singkat tentang ketel Lanchashire dengan bantuan diagram.
4. Uraikan dengan sketsa cara kerja ketel uap lokomotif.
5. Boiler berbahan bakar batubara mengkonsumsi batubara 400 kg per jam. Boiler menguapkan 3200 kg air pada $44,5^{\circ}\text{C}$ ke uap panas lanjut pada tekanan 12 kg/cm^2 abs dan $274,5^{\circ}\text{C}$. Jika nilai kalor bahan bakar adalah 7.800 kcal/kg , carilah: (a) penguapan ekuivalen dari dan pada 100°C , (b) efisiensi termal boiler.
6. Data berikut berkaitan dengan pembangkit uap yang terdiri dari boiler, ekonomiser dan superheater.
 - tekanan uap : 14 kg/cm^2 abs
 - berat uap yang dihasilkan : 5.000 kg/hr
 - berat batubara yang digunakan : 675 kg/hr
 - nilai kalor batubara : 7.100 kcal/kg
 - temperatur air umpan memasuki ekonomiser : 30°C
 - temperatur air umpan meninggalkan ekonomiser : 130°C
 - fraksi kekeringan uap meninggalkan boiler : $0,97$
 - temperatur uap air meninggalkan superheater : 320°CCarilah (a) efisiensi keseluruhan pembangkit, (b) persentase kalor yang tersedia yang digunakan di boiler, ekonomiser, dan superheater.
7. Sebuah boiler menghasilkan 4 kg uap per kg batubara dari air umpan dengan suhu 45°C . Tekanan uap adalah $10,5\text{ kg/cm}^2$ abs. Jika fraksi kekeringan uap $0,98$, carilah penguapan ekuivalen dari dan pada 100°C .

BAB IV

TURBIN UAP

Turbin uap adalah penggerak mula (*prime mover*) dimana gerak putar diperoleh dengan perubahan gradual dari momentum uap. Pada turbin uap, gaya dibangkitkan pada sudu (*blade*) karena kecepatan uap. Ini terjadi karena sudu yang berbentuk lengkung akan merubah arah uap sehingga menerima gaya atau impuls. Kerja uap dalam hal ini disebut *dinamik*. Karena itu tekanan dinamik uap akan memutar sudu secara langsung.

Secara umum, sebuah turbin uap secara prinsip terdiri dari dua komponen berikut:

1. Nosel, dimana energi panas dari uap tekanan tinggi dirobah menjadi energi kinetik, sehingga uap keluar dari nosel dengan kecepatan sangat tinggi.
2. Sudu, yang merubah arah dari uap yang disemprotkan nosel, sehingga akan bekerja gaya pada sudu karena perubahan momentum dan memutar turbin.

Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap secara mudah bisa diklasifikasikan ke dalam jenis-jenis berikut:

1. Berdasarkan aksi uap:
 - (i) Turbin impuls
 - (ii) Turbin reaksi
2. Berdasarkan arah aliran uap:
 - (i) Turbin aliran aksial
 - (ii) Turbin aliran radial
3. Berdasarkan kondisi exhaust uap:
 - (i) Turbin kondensasi
 - (ii) Turbin non-kondensasi
4. Berdasarkan tekanan uap:
 - (i) Turbin tekanan tinggi
 - (ii) Turbin tekanan sedang
 - (iii) Turbin tekanan rendah
5. Berdasarkan jumlah tingkat:

- (i) Turbin tingkat satu (*single stage turbine*)
- (ii) Turbin banyak tingkat (*multi stage turbine*)

A. Turbin Impuls

Turbin impuls sesuai namanya adalah turbin yang berjalan dengan impuls dari semburan/jet uap. Pada turbin jenis ini, uap pertama-tama mengalir melalui nosel, kemudian semburan uap dari nosel akan menumbuk sudu turbin yang terpasang pada roda. Semburan uap setelah menumbuk sudu, mengalir melalui permukaan cekung sudu dan pada akhirnya meninggalkan turbin.

Turbin Impuls De-Lavel

Turbin De-Lavel adalah jenis paling sederhana dari turbin uap impuls dan banyak digunakan. Turbin mempunyai komponen-komponen utama berikut ini:

1. Nosel.

Adalah mekanisme pengarah berbentuk lingkaran, yang mengarahkan uap mengalir sesuai kecepatan dan arah yang sudah didesain. Nosel juga mengatur aliran uap. Posisi nosel dibuat sedekat mungkin dengan sudu, untuk meminimalkan kerugian.

2. Sudu dan *runner*.

Runner turbin De-Lavel pada prinsipnya terdiri dari piringan bulat yang terpasang pada poros horisontal. Pada sekeliling *runner* dipasang sejumlah sudu yang sama. Semburan uap menumbuk mangkok (sudu), yang kemudian bergerak searah semburan. Gerakan sudu ini membuat *runner* berputar.

Permukaan sudu dibuat sangat halus untuk meminimalkan kerugian gesek. Sudu biasanya terbuat dari paduan *baja*. Pada sebagian besar konstruksi, sudu dibuat ke *runner*, tetapi kadang-kadang sudu dan piringan dicor sebagai satu unit tunggal.



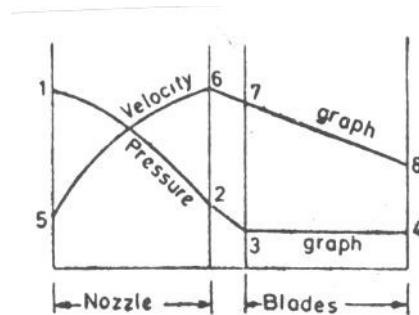
Gambar 1. Runner dan mangkok turbin impuls.

3. Rumah turbin / casing.

Merupakan rumah logam kedap udara, yang berisikan runner turbin dan sudu. Rumah turbin mengatur gerakan uap dari sudu hingga kondenser dan tidak memungkinkan untuk mengalir ke udara. Rumah turbin juga berfungsi sebagai pengaman *runner* dari kemungkinan berbagai kecelakaan.

Tekanan Dan Kecepatan Uap Pada Turbin Impuls

Tekanan semburan uap berkurang di dalam nosel dan konstan ketika melalui sudu yang bergerak. Kecepatan uap naik di dalam nosel dan berkurang ketika melalui sudu yang bergerak. Gambar 2 memperlihatkan grafik tekanan dan kecepatan uap ketika mengalir pada nosel dan sudu. Grafik 1-2-3-4 menyatakan tekanan uap pada sisi masuk nosel, sisi keluar nosel, sisi masuk sudu dan sisi keluar sudu. Grafik 5-6-7-8 menyatakan kecepatan uap pada sisi masuk nosel, sisi keluar nosel, sisi masuk sudu dan sisi keluar sudu.

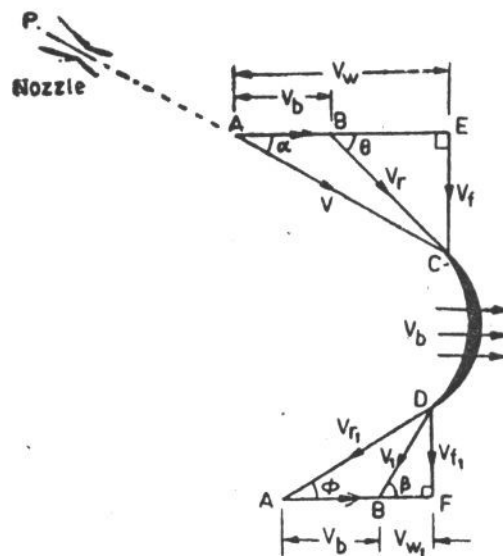


Gambar 2. Kelompok tekanan dan kecepatan uap.

Segitiga Kecepatan Bagi Sudu Bergerak Pada Turbin Impuls

Uap setelah meninggalkan nosel, menumbuk salah satu ujung sudu. Uap kemudian mengalir pada sisi permukaan dalam sudu dan akhirnya meninggalkan sudu pada ujung lainnya seperti diperlihatkan oleh gambar 3.

Semburan uap memasuki sudu pada C. Kemudian uap mengalir pada sudu dan meninggalkan sudu pada D. Segitiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar sudu bisa digambar seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Segitiga kecepatan turbin impuls.

Dimana : V_b = Kecepatan linier sudu yang bergerak (AB)

V = Kecepatan absolut uap memasuki sudu (AC)

V_r = Kecepatan relatif uap memasuki sudu (BC). Merupakan perbedaan vektor antara V dan V_b .

V_f = Kecepatan aliran memasuki sudu bergerak (merupakan komponen vertikal V)

V_w = Kecepatan pusar pada sisi masuk sudu bergerak (merupakan komponen horisontal komponen V).

θ = Sudut antara kecepatan relatif uap dengan sudu.

α = Sudut antara sudu dengan uap yang memasuki sudu

$V_1, V_{r1}, V_{f1}, V_{w1}, \beta, \phi$ = Besaran yang sama untuk sisi keluar sudu.

Dari gambar 3, PC adalah sumbu nosel. Komponen aksial V (yaitu EC) yang tidak bekerja pada sudu disebut *kecepatan aliran* (V_f). Kecepatan ini menyebabkan uap mengalir melalui turbin dan juga gaya dorong aksial pada rotor. *Kecepatan linier* atau *kecepatan sudu rata-rata* (yaitu V_b) digambarkan dengan AB dalam besar dan arah. Panjang BC merupakan kecepatan relatif (V_r) semburan uap terhadap sudu.

Uap meninggalkan sudu dengan kecepatan relatif (V_{r1}), yang digambarkan dengan DA . Kecepatan absolut uap (V_1) meninggalkan sudu diwakili dengan garis DB dengan sudut β dengan arah gerak sudu. Komponen tangensial V_r (diwakili oleh BF) disebut kecepatan pusar pada sisi keluar (V_{w1}). Komponen aksial V_1 (diwakili oleh DF) disebut kecepatan aliran pada sisi keluar (V_{f1}).

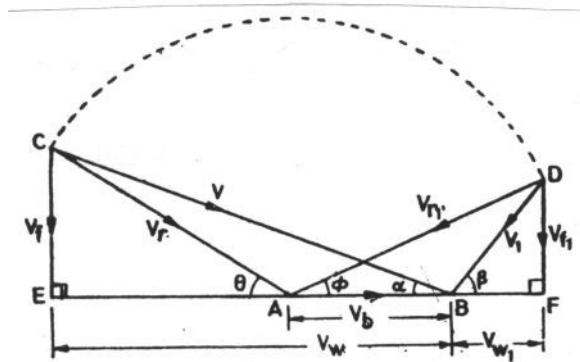
- Catatan :
1. Segitiga kecepatan sisi masuk diwakili oleh AEC , sedangkan segitiga sisi keluar diwakili oleh AFD .
 2. Hubungan antara segitiga kecepatan sisi masuk dan sisi keluar :

$$V_r = V_{r1}$$

Segitiga Kecepatan Gabungan Untuk Sudu Bergerak

Untuk memudahkan, bisa digambar segitiga kecepatan gabungan sisi masuk dan keluar sudu seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.

Kecepatan Gabungan



Gambar 4. Segitiga kecepatan gabungan untuk turbin impuls De-level.

Langkah-langkah menggambar segitiga gabungan :

1. Pertama-tama, gambarlah garis horisontal, dan tandai titik AB sesuai dengan kecepatan sudu (V_b) dengan skala tertentu.
2. Pada B , gambarlah garis BC dengan sudut α dengan AB . Tandai panjang BC sesuai dengan kecepatan V (yaitu kecepatan semburan uap pada sisi masuk sudu) sesuai skala.
3. Tariklah garis AC , yang mewakili kecepatan relatif sisi masuk (V_r). Sekarang pada A gambarlah garis AD dengan sudut ϕ dengan AB .
4. Sekarang dengan A sebagai pusat dan jari-jari AC , gambarlah busur yang memotong garis ke B pada D .
5. Gambarkan garis BD yang merupakan kecepatan semburan disisi keluar (V_1) sesuai skala.
6. Dari C dan D gambarlah garis tegak lurus yang memotong garis AB pada E dan F .
7. Sekarang EB dan CE mewakili kecepatan pusar dan kecepatan aliran pada sisi masuk (V_w dan V_f) sesuai skala. Dengan cara yang sama, BF dan DF merupakan kecepatan pusar dan kecepatan aliran pada sisi keluar (V_{w1} dan V_{f1}) sesuai skala.

Daya Yang Dihasilkan Oleh Turbin Impuls

Jika turbin impuls bekerja dengan segitiga kecepatan seperti gambar 4, misalkan:

W = berat uap yang mengalir melalui turbin, kg/s

$(V_w + V_{w1})$ = Perubahan kecepatan pusar, m/s

Sesuai dengan hukum kedua Newton tentang gerak, gaya pada arah gerak sudu:

$$F_x = \frac{W}{g} [V_w - (-V_{w1})]$$

$$= \frac{W}{g} [V_w + V_{w1}] = \frac{W}{g} EF \quad \text{kg-f} \quad (\text{i})$$

Kerja yang dilakukan dalam arah gerak sudu per detik:

$$= \frac{W}{g} [V_w + V_{w1}] V_b$$

$$= \frac{W}{g} \times EF \times AB \quad \text{kg.m} \quad (\text{ii})$$

Daya yang dihasilkan turbin:

$$P = W \frac{(V_w + V_{w1}) V_b}{g \times 75} \quad \text{hp}$$

atau (dalam SI) : $P = W(V_w + V_{w1}) V_b \quad \text{watt}$

Gaya dorong pada roda turbin:

$$F_Y = \frac{W}{g} (V_f - V_{f1}) = \frac{W}{g} (CE - DF) \quad \text{kg-f}$$

Contoh soal

Pada turbin De-level, uap memasuki roda melalui nosel dengan kecepatan 500 m/s dan pada sudut 20° terhadap arah gerak sudu. Sudu mempunyai kecepatan 200 m/s dan sudut keluar sudu bergerak adalah 25° . Carilah sudut masuk sudu bergerak, kecepatan keluar uap dan arahnya dan kerja yang dilakukan per kg uap.

Jawab:

Diketahui: Kecepatan uap memasuki roda, $V = 500 \text{ m/s}$

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

Kecepatan sudu, $V_b = 200 \text{ m/s}$

Sudut keluar sudu bergerak, $\phi = 25^\circ$

Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut:

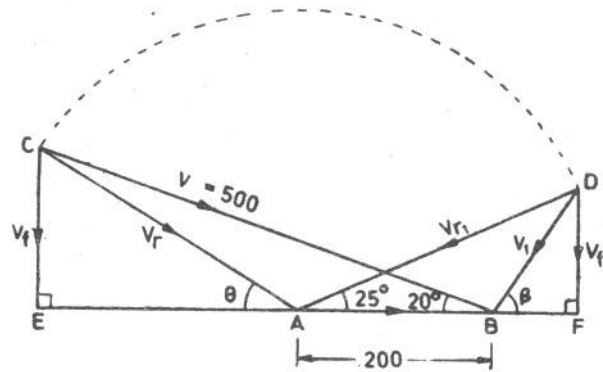


Fig. 21-5

1. Pertama-tama gambarlah garis horizontal dan potong AB yang besarnya sama dengan 200 m/s dengan menggunakan skala tertentu.
2. Pada B , gambar garis BC dengan sudut 20° (sudut nosel) dan potong BC yang besarnya sama dengan 500 m/s sesuai skala yang merupakan kecepatan uap memasuki sudu (V).
3. Buat garis AC , yang merupakan kecepatan relatif pada sisi masuk.
4. Pada A , gambar garis AD dengan sudut 25° (sudut keluar dari sudu bergerak). Dengan A sebagai pusat, dan jari-jari sama dengan AC , gambarlah busur yang akan memotong garis AD pada D .
5. Sambungkan BD , yang merupakan kecepatan jet sisi keluar.
6. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 32^\circ ; \beta = 59^\circ ; V_1 = 175 \text{ m/s}$$

$$V_w = 470 \text{ m/s} ; \text{ dan } V_{w1} = 90 \text{ m/s}$$

Sudut masuk sudu bergerak

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut masuk sudu bergerak:

$$\theta = 32^\circ$$

Kecepatan keluar uap

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh kecepatan keluar uap:

$$V_1 = 175 \text{ m/s}$$

Arah keluar uap

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh arah uap keluar:

$$\beta = 59^\circ$$

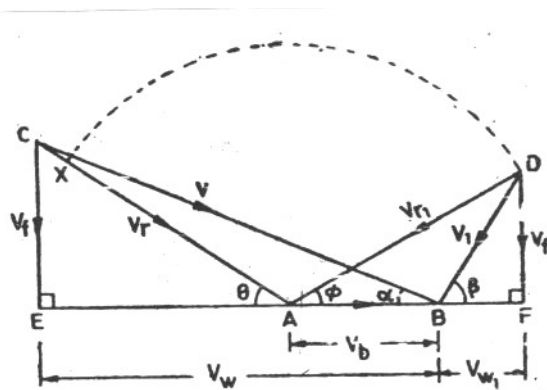
Kerja per kg air

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{g} (V_w + V_{w1}) V_b \\ &= \frac{1}{9,81} (470 + 90) 200 = 11.420 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

Pengaruh Gesekan Pada Segitiga Kecepatan Gabungan

Pada kenyataannya terdapat gesekan pada permukaan sudu dimana uap mengalir. Efek gesekan ini akan mengurangi kecepatan relatif uap. Atau dengan kata lain, untuk membuat V_{r1} lebih kecil dari V_r . Rasio V_r terhadap V_{r1} disebut sebagai *koefisien kecepatan sudu* atau koefisien kecepatan atau faktor gesekan, (biasanya dilambangkan dengan K). Secara matematik, koefisien kecepatan sudu adalah :

$$K = \frac{V_{r1}}{V_r}$$



Gambar 6. Efek gesekan pada segitiga kecepatan gabungan.

Efek gesekan pada segitiga kecepatan gabungan diperlihatkan dengan berkurangnya kecepatan relatif pada sisi keluar (V_{r1}) seperti yang diperlihatkan gambar 6.

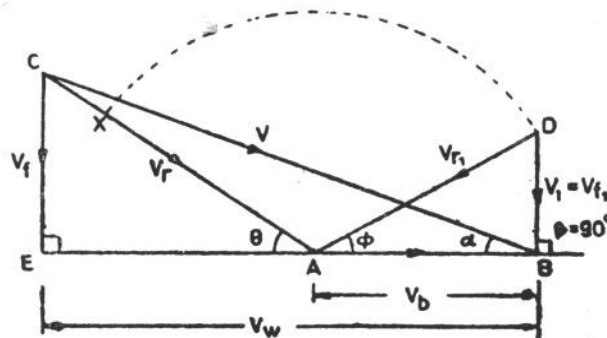
Catatan : 1. Karena V_{r1} menurun karena gesekan, maka kerja yang dilakukan per kg uap juga menurun.

2. Harga K bervariasi dari 0,75 sampai 0,85, tergantung pada bentuk sudu.

Diagram Kecepatan Gabungan Untuk Aliran Aksial

Kadang-kadang uap meninggalkan sudu pada ujungnya pada sudut 90° terhadap arah gerak sudu. Pada kondisi ini turbin dikatakan mempunyai keluaran/aliran aksial. Diagram kecepatan gabungan untuk aliran aksial digambarkan pada gambar 7. Perlu dicatat bahwa kecepatan pusar pada sisi keluar untuk jenis turbin ini (V_{w1}) adalah nol, karenanya kerja turbin adalah:

$$= \frac{W}{g} V_w V_b$$



Gambar 7. Diagram kecepatan gabungan untuk keluaran aksial.

Contoh soal

Kecepatan uap meninggalkan nosel sebuah turbin impuls adalah 1.200 m/s dan sudut nosel adalah 20° . Kecepatan sudu adalah 375 m/s dan koefisien kecepatan sudu adalah 0,75. Dengan mengasumsikan tidak ada kerugian karena kejut pada sisi masuk, aliran massa 0,5 kg/s dan sudu simetris, hitunglah: (a) sudut masuk sudu, (b) gaya dorong roda, (c) gaya aksial pada roda, dan (d) daya yang dihasilkan turbin.

Jawab

Diketahui: Kecepatan uap memasuki sudu, $V = 1.200$ m/s

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

4. Pada A , gambar garis AD dengan sudut ϕ (sama dengan sudut θ). Dengan A sebagai pusat, dan jari-jari sama dengan AX , gambarlah busur yang akan memotong garis AD pada D .
5. Sambungkan BD , yang merupakan kecepatan jet sisi keluar (V_1).
6. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 29^\circ ; V_w = 1.130 \text{ m/s} ; V_{w1} = 190 \text{ m/s}$$

$$V_f = 410 \text{ m/s} ; \text{ dan } V_{f1} = 310 \text{ m/s}$$

- a. Sudut masuk sudu

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut masuk sudu:

$$\theta = 29^\circ$$

- b. Gaya dorong roda

Misalkan F_x = gaya dorong roda

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{W}{g} (V_w + V_{w1}) \\ &= \frac{0,5}{9,81} (1.130 + 190) = 67.3 \end{aligned}$$

- c. Gaya aksial pada roda

Misalkan F_y = gaya aksial pada roda

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{W}{g} (V_f - V_{f1}) \\ &= \frac{0,5}{9,81} (410 - 310) = 5.1 \end{aligned}$$

- d. Daya yang dihasilkan turbin

Misalkan P = daya yang dihasilkan turbin

$$P = \frac{W (V_w + V_{w1}) V_b}{g \times 75}$$

$$= \frac{0,5(1.130 + 190) \times 375}{9,81 \times 75} = 336,4 \text{ hp}$$

Contoh soal

Jet uap memasuki barisan sudu dengan kecepatan 375 m/s pada sudut 20° terhadap arah gerak sudu. Jika kecepatan sudu adalah 165 m/s, carilah sudut sudu sisi masuk dan keluar dengan mengasumsikan tidak ada gaya aksial pada sudu. Kecepatan uap melewati sudu berkurang sebesar 15%. Cari juga daya yang dihasilkan oleh turbin per kg uap yang mengalir pada sudu setiap detiknya.

Jawab

Diketahui: Kecepatan uap memasuki sudu, $V = 375 \text{ m/s}$

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

Kecepatan sudu, $V_b = 165 \text{ m/s}$

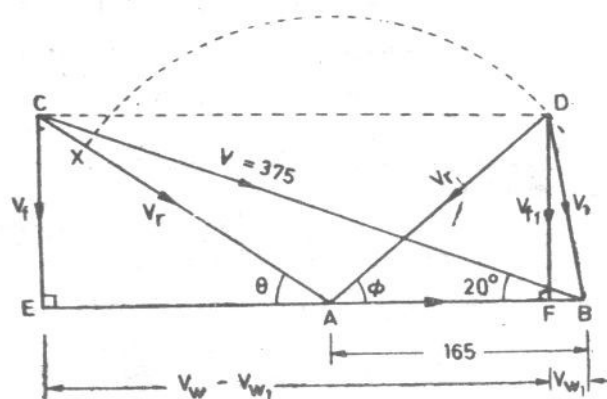
Penurunan kecepatan jet ketika melalui sudu = 15%

Maka : $V_{r1} = 0,85 V_r$

Karena tidak ada gaya aksial pada sudu maka:

$$V_f = V_{f1}$$

Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar di berikut:



1. Pertama-tama gambarlah garis horisontal dan potong AB yang besarnya sama dengan 165 m/s dengan menggunakan skala tertentu yang merupakan kecepatan sudu (V_b).
2. Gambar segitiga kecepatan sisi masuk ABC pada AB dengan $\alpha = 20^\circ$ dan $V = 375 \text{ m/s}$ sesuai skala. Dari segitiga kecepatan diperoleh $V_f = 130 \text{ m/s}$ dan $V_r = 230 \text{ m/s}$.
3. Dengan cara yang sama, gambarlah segitiga kecepatan sisi keluar ABD pada dasar sama AB dengan $V_{r1} = 0,85 V_r = 0,85 \times 230 = 195,5 \text{ m/s}$ sesuai skala dan $V_{f1} = V_f = 130 \text{ m/s}$.
4. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F . Dari bentuk gambar, kita dapatkan bahwa V_{w1} mempunyai arah yang berlawanan dengan V_w .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 34^\circ ; \quad \phi = 41^\circ ; \quad \text{dan } (V_w - V_{w1}) = 320 \text{ m/s}$$

Sudut sudu sisi masuk dan keluar

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut sisi masuk sudu:

$$\theta = 34^\circ$$

dan sudut sisi keluar sudu:

$$\phi = 41^\circ$$

Daya yang dihasilkan turbin

Diketahui berat uap yang mengalir pada sudu adalah, $W = 1 \text{ kg/s}$

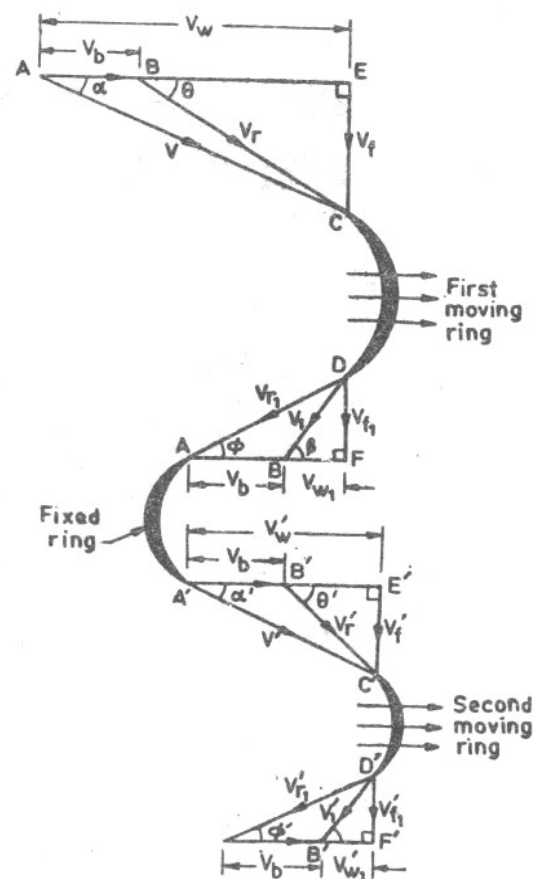
Misalkan $P =$ daya yang dihasilkan turbin

$$\begin{aligned} P &= W (V_w - V_{w1}) V_b \\ &= 1 (320) \times 165 = 52.800 \text{ W} \\ &= 52,8 \text{ kW} \end{aligned}$$

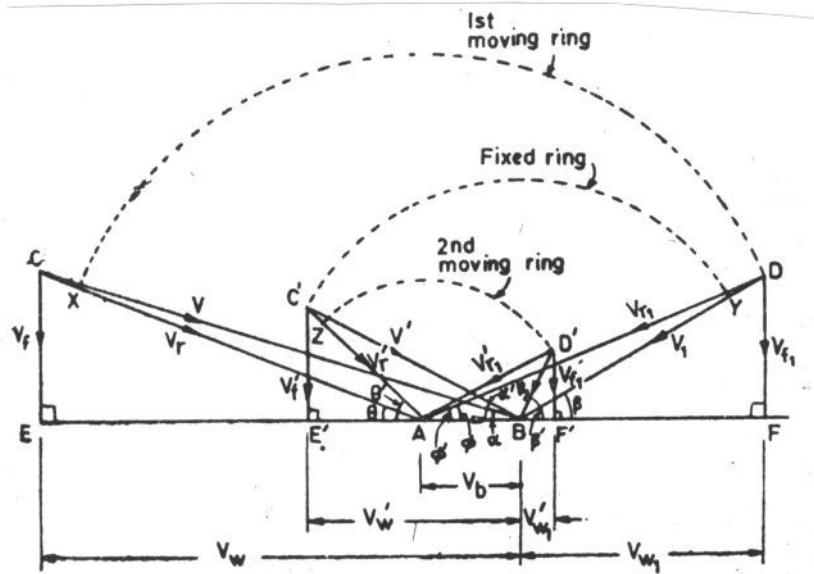
Diagram Kecepatan Untuk Turbin Impuls Dua Tingkat

Pada pembicaraan sebelumnya, kita telah membahas turbin impuls dimana uap setelah keluar dari nosel menumbuk salah satu ujung sudu, meluncur pada permukaan dalam, meninggalkan sudu dan keluar ke kondenser. Tetapi, kadang-kadang uap setelah meninggalkan sudu bergerak dibuat mengalir ke cincin tetap (supaya uap mengalir pada sudut tertentu) dan kembali menumbuk sudu bergerak kedua. Jenis turbin ini disebut turbin impuls dua tingkat, dimana segitiga kecepatannya diperlihatkan pada gambar 10.

Perlu dicatat bahwa kecepatan sudu (V_b) konstan pada kedua tingkat. Kecepatan absolut pada sisi keluar sudu bergerak pertama adalah kecepatan masuk pada cincin sudu tetap (fixed ring) dan kecepatan keluar dari cincin tetap adalah kecepatan masuk cincin sudu bergerak kedua.



Gambar 10. Turbin impuls dua tingkat.



Gambar 11. Segitiga kecepatan gabungan untuk turbin impuls dua tingkat.

Segitiga kecepatan gabungan untuk turbin impuls dua tingkat bisa dilihat pada gambar 11 dan dibicarakan berikut ini.

1. Pertama-tama, gambarlah garis horisontal dan tandailah AB yang besarnya sama dengan kecepatan sudu sesuai denganskala yang dipilih.
2. Sekarang gambar segitiga kecepatan masuk ABC untuk ring bergerak pertama pada AB dengan bantuan sudut nosel dari cincin bergerak pertama (α) dan kecepatan uap memasuki turbin (V).
3. Sekarang potong CX sebesar gesekan sudu pada cincin bergerak pertama. Panjang AX akan memberikan harga kecepatan relatif pada sisi keluar cincin bergerak pertama (V_{r1}).
4. Sekarang gambar segitiga kecepatan sisi keluar ABD untuk cincin bergerak pertama pada basis AB yang sama dengan bantuan sudut sudu sisi keluar cincin bergerak pertama (ϕ) dan kecepatan relatif pada sisi keluar dari cincin bergerak pertama (V_{r1}).
5. Sekarang potong DY sebesar harga gesekan sudu cincin tetap. Panjang BY merupakan kecepatan keluar uap dari cincin tetap dan besarnya sama dengan kecepatan uap memasuki cincin bergerak kedua (V_{r2}).

6. Sekarang gambarlah segitiga kecepatan masuk ABC' untuk cincin bergerak kedua pada basis AB dengan bantuan sudut nosel cincin bergerak kedua (α') dan kecepatan uap memasuki cincin bergerak kedua (V').
7. Sekarang potong $C'Z$ sebesar gesekan sudu pada cincin bergerak kedua. Panjang AZ akan memberikan harga kecepatan relatif pada sisi keluar cincin bergerak kedua (V_{r1}').
8. Sekarang gambarlah segitiga kecepatan sisi keluar ABD' untuk cincin bergerak kedua pada basis AB dengan bantuan sudut sudu sisi keluar cincin bergerak kedua (ϕ') dan kecepatan keluar dari cincin bergerak kedua (V_{r1}').

Daya yang dihasilkan turbin impuls dua tingkat adalah :

- Dalam satuan MKS :

$$P = \frac{WV_b}{g \cdot 75} (EF + E'F') \text{ hp}$$

- Dalam satuan SI :

$$P = WV_b (EF + E'F') \text{ watt}$$

B. Turbin Reaksi

Pada turbin reaksi, uap masuk ke roda dengan tekanan tertentu dan mengalir pada sudu. Uap ketika meluncur, memutar sudu dan membuatnya bergerak. Kenyataannya, runner turbin berotasi karena gaya reaktif semburan uap.

Turbin Reaksi Parson

Turbin Parson adalah jenis turbin reaksi yang paling sederhana dan banyak digunakan. Turbin mempunyai komponen-komponen utama sebagai berikut:

1. Rumah turbin (Casing).

Merupakan rumah logam kedap udara, dimana uap dari ketel, dibawah tekanan dan temperatur tertentu, didistribusikan disekeliling sudu tetap (mekanisme pengarah) di dalam rumah turbin. Rumah turbin didesain sedemikian sehingga uap memasuki sudu tetap dengan kecepatan yang seragam.

2. Mekanisme pengarah.

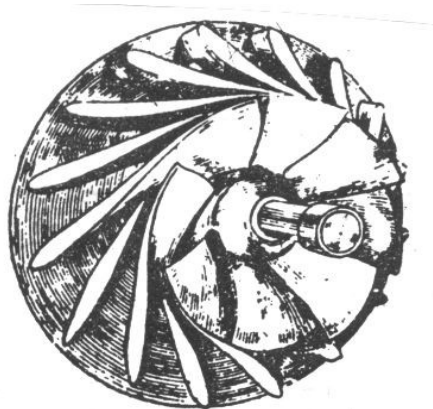
Adalah sebuah mekanisme, dibuat dengan bantuan sudu pengarah, dalam bentuk roda. Roda ini umumnya menyatu dengan rumah turbin, karena itu sudu pengarah ini juga disebut sudu tetap. Sudu pengarah didesain untuk:

- a) membuat uap memasuki runner tanpa guncangan. Hal ini dilakukan dengan menjaga kecepatan relatif pada sisi masuk runner tangensial terhadap sudut sudu.
- b) Membuat sejumlah uap yang dibutuhkan memasuki turbin. Hal ini dilakukan dengan mengatur bukaan sudu.

Sudu pengarah bisa dibuka atau ditutup dengan memutar poros pengatur, sehingga uap bisa mengalir sesuai kebutuhan. Poros pengatur digerakkan oleh governor.

3. Runner turbin.

Runner turbin Parson prinsipnya terdiri dari sudu *runner* yang terpasang pada sebuah poros atau cincin, tergantung pada jenis turbin. Sudu, yang terpasang pada runner, didesain supaya uap masuk dan keluar runner tanpa guncangan seperti terlihat pada gambar 12.



Gambar 12. Runner turbin.

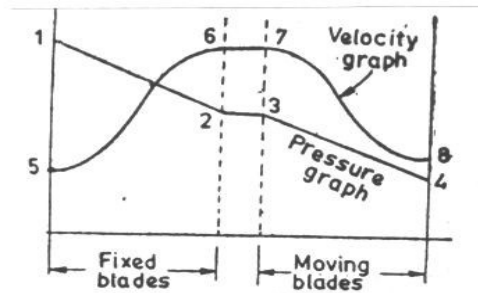
Permukaan runner turbin dibuat dengan sangat licin untuk meminimalkan kerugian gesekan.

4. Draft tube.

Uap setelah melewati runner, mengalir ke kondenser melalui tube/pipa yang disebut *draft tube*. Perlu dicatat bahwa jika pipa ini tidak disediakan pada turbin, maka uap akan bergerak dengan bebas dan menyebabkan *arus eddy* uap.

Tekanan Dan Kecepatan Uap Pada Turbin Reaksi

Tekanan pada turbin reaksi akan berkurang ketika melalui sudu tetap dan sudu bergerak. Kecepatan uap meningkat pada sudu tetap dan berkurang ketika melalui sudu bergerak. Gambar 13 memperlihatkan grafik tekanan dan kecepatan uap ketika mengalir pada sudu tetap dan sudu bergerak.



Gambar 13. Grafik tekanan dan kecepatan dari turbin reaksi.

Grafik tekanan 1-2-3-4 mewakili tekanan uap masing-masing pada sisi masuk sudu tetap, keluar sudu tetap, memasuki sudu bergerak dan sisi keluar sudu bergerak. Dengan cara yang sama, grafik kecepatan 5-6-7-8 mewakili kecepatan uap masing-masing pada sisi masuk sudu tetap, sisi keluar sudu tetap, sisi masuk sudu bergerak dan sisi keluar sudu bergerak.

Perbandingan Antara Turbin Impuls Dan Turbin Reaksi

Berikut ini beberapa hal tentang perbandingan antara turbin impuls dan turbin reaksi.

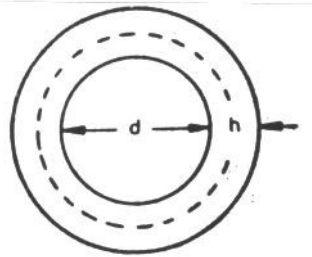
No.	Turbin Impuls	Turbin Reaksi
1.	Uap mengalir melalui nosel dan menumbuk sudu bergerak.	Uap mengalir pertama-tama melalui mekanisme pengarah dan kemudian melalui sudu bergerak.
2.	Uap menumbuk mangkok dengan energi kinetik.	Uap meluncur pada sudu bergerak dengan tekanan dan energi kinetik.
3.	Uap boleh mengalir di keseluruhan atau hanya disebagian lingkaran runner.	Uap harus mengalir di keseluruhan lingkaran runner.
4.	Tekanan uap konstan selama mengalir pada sudu bergerak.	Tekanan uap turun selama mengalir pada sudu bergerak.
5.	Kecepatan relatif uap selama mengalir pada sudu konstan.	Kecepatan relatif uap selama mengalir pada sudu naik.
6.	Sudu simetris.	Sudu tidak simetris.
7.	Jumlah tingkat yang diperlukan lebih sedikit untuk daya yang sama.	Jumlah tingkat yang diperlukan lebih banyak untuk daya yang sama.

Segitiga Kecepatan Untuk Sudu Turbin Reaksi

Grafik segitiga kecepatan turbin reaksi sama dengan segitiga kecepatan pada turbin impuls. Penggambaran segitiga kecepatan gabungan dan rumus daya turbin sama dengan yang digunakan pada turbin impuls.

Tinggi Sudu Turbin Reaksi

Pada turbin reaksi, uap memasuki sudu bergerak di keseluruhan lingkaran turbin. Karenanya daerah dimana uap mengalir selalu penuh dengan uap. Misalkan pandangan samping turbin seperti gambar 14.



Gambar 14. Tinggi sudu untuk turbin reaksi.

Dengan : d = diameter drum rotor

h = tinggi sudu

V_{f1} = kecepatan aliran pada sisi keluar

Luas daerah yang tersedia bagi uap untuk mengalir:

$$A = \pi(d+h) h$$

Dan volume uap yang mengalir:

$$= A \cdot V_{f1} = \pi(d+h) h \cdot V_{f1}$$

Berat 1 kg uap pada tekanan tertentu misalkan v_s maka berat uap yang mengalir:

$$W = \frac{\pi(d+h)h.V_{f1}}{v_s} \quad \text{kg/s}$$

Jika uap mempunyai fraksi/persentase kekeringan x maka berat uap yang mengalir:

$$W = \frac{\pi(d+h)h.V_{f1}}{x.v_s}$$

$$W = \frac{\pi d_m . h . V_{f1}}{x . v_s} \quad \text{kg/s}$$

dimana: d_m = diameter sudu rata-rata

$$= (d+h)$$

v_s = volume spesifik (m^3/kg)

Contoh Soal.

Pada tingkatan tertentu dari turbin reaksi, kecepatan sudu rata-rata adalah 60 m/s, uap mempunyai tekanan 3,0 bar dengan temperatur 200° C. Jika sudu diam dan sudu bergerak pada tingkatan ini mempunyai sudut masuk 30° dan sudut keluar 20°, carilah (i) tinggi sudu, jika tinggi sudu adalah 1/10 diameter lingkaran rata-rata sudu dan uap mengalir pada 10 kg/s, (ii) daya yang dihasilkan oleh pasangan sudu tetap dan bergerak pada tingkatan ini.

Jawab.

Diketahui: kecepatan sudu, $V_b = 60$ m/s

tekanan uap = 3,0 bar

temperatur uap = 200° C

sudut masuk sudu tetap/diam,

$$\theta = \beta = 30^\circ$$

sudut keluar sudu diam,

$$\alpha = \phi = 20^\circ$$

(i) Tinggi sudu

$$h = d/10$$

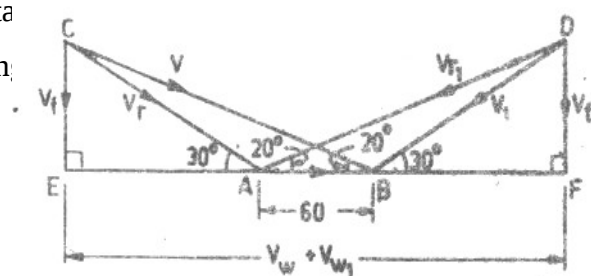
$$d = 10 h$$

berat aliran uap,

$$W = 10 \text{ kg/s}$$

Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti gambar berikut:

1. Pertama-tama sesuai den:



an AB yang besarnya

2. Gambar segitiga kecepatan sisi masuk ABC pada dasar AB dengan $\alpha = 20^\circ$ dan $\theta = 30^\circ$.
3. Dengan cara yang sama gambar segitiga kecepatan sisi keluar ABD pada basis yang sama AB dengan $\phi = 20^\circ$ dan $\beta = 30^\circ$.
4. Dari C dan D gambar garis tegak lurus yang bertemu pada AB pada titik E dan F .

Dengan pengukuran dari gambar, diperoleh bahwa perubahan kecepatan pusat ($V_w + V_{w1}$) = 265 m/s, dan kecepatan keluar pada sisi keluar (V_{f1}) = 60 m/s.

Dari tabel uap untuk uap panas lanjut (*superheat*) pada tekanan 3,0 bar dan 200°C , didapatkan **volume spesifik uap**:

$$v_s = 0,7164 \text{ m}^3/\text{kg}$$

maka:

$$W = \frac{\pi(d+h)h \cdot V_{f1}}{v_s}$$

$$10 = \frac{\pi(10h+h)h \cdot 60}{0,7164} = 2.894 h^2$$

$$h = 0,059 \text{ m} = 59 \text{ mm}$$

(ii) Daya yang dihasilkan

$$\begin{aligned} P &= W(V_w + V_{w1}) V_b \\ &= 10 \times 265 \times 60 = 159.000 \text{ Watt} \\ &= 159 \text{ kW} \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Kecepatan periperiferal rotor turbin De-Laval adalah 300 m/s dan kecepatan absolut uap pada sisi masuk 720 m/s pada 20° terhadap arah gerak rotor. Carilah:
 - a. Kecepatan absolut uap meninggalkan rotor, jika air keluar 20° terhadap arah rotor.
 - b. Daya kuda roda, jika konsumsi uap 2,7 kg/min.
2. Uap keluar nosel dari turbin impuls satu tingkat pada kecepatan 1000 m/s dan nosel mempunyai sudut 24° terhadap arah gerak sudu, yang bergerak dengan kecepatan 400 m/s. Sudut sudu sisi masuk sama dengan sisi keluar. Jika uap memasuki dan meninggalkan sudu tanpa *shock* dan mengalir pada sudu tanpa gesekan, carilah sudut masuk sudu. Cari juga gaya yang dihasilkan sudu pada arah geraknya dan daya yang dihasilkan ketika uap mengalir dengan laju 4000 kg/hr.
3. Sebuah turbin impuls sederhana disuplai oleh uap dengan tekanan $10,5 \text{ kg/cm}^2$ dan 40°C panas lanjut (*superheat*). Tekanan pada ruang roda adalah $1,05 \text{ kg/cm}^2$ dan efisiensi nosel 90%. Jika sudut nosel 20° , koefisien kecepatan 0,8 dan sudu mempunyai sudut sama, untuk efisien maksimum carilah:
 - a. kecepatan sudu.
 - b. Sudut sudu.
 - c. Daya kuda yang dihasilkan, jika uap mengalir dengan kecepatan 9000 kg/hr.
4. Pada turbin reaksi Parson, diameter drum 1,1 m dan tinggi sudu 10 cm. Sudut masuk dan keluar masing-masing adalah 35° dan 20° terhadap arah gerak. Pada titik tertentu di dalam turbin tekanan uap $1,8 \text{ kg/cm}^2$ dan fraksi kekeringan 0,93. Carilah massa uap yang mengalir per detik dan daya kuda yang dibangkitkan cincin sudu bergerak, jika turbin berputar dengan kecepatan 250 rpm.
5. Sebuah turbin reaksi mempunyai kecepatan 3000 rpm dan diameter rata-rata sudu pada sebuah pasangan adalah 75 cm. Sudut keluar sudu 20° , sudut tetap dan sudu bergerak identik. Uap mengalir dengan laju 810 kg/min. Jika daya kuda yang dibangkitkan perpasang 300 dan tekanan uap $2,8 \text{ kg/cm}^2$ dalam keadaan kering, hitunglah sudut sudu dan tinggi sudu.
6. Apa yang dimaksud dengan turbin reaksi, dan apa yang membedakannya dengan turbin impuls!
7. Apa yang anda ketahui tentang istilah "tinggi sudu" pada turbin reaksi.
8. Informasi penting apa yang diberikan oleh tinggi sudu.

BAB V

TURBIN GAS

Pada turbin gas, pertama-tama udara diperoleh dari udara atmosfer dan di kompresi dengan menggunakan kompresor udara. Udara kompresi kemudian disalurkan ke ruang bakar, dimana udara dipanaskan. Udara panas kemudian dialirkan ke sudu bergerak turbin sehingga menimbulkan gerak putar pada *runner*. Selama proses ini udara berekspansi dan akhirnya dibuang ke atmosfer. Bagian utama dari daya yang dihasilkan turbin digunakan oleh kompresor. Daya sisanya dimanfaatkan untuk kerja eksternal.

Perbandingan Antara Turbin Gas Dengan Turbin Uap

Berikut ini adalah perbandingan antara turbin gas dengan turbin uap.

No.	Turbin Gas	Turbin Uap
1.	Komponen pentingnya adalah kompresor dan ruang bakar.	Komponen pentingnya adalah ketel uap dan asesoris.
2.	Berat turbin per daya kuda yang dihasilkan lebih kecil.	Berat turbin per daya kuda yang dihasilkan lebih besar.
3.	Memerlukan ruang yang sedikit untuk instalasi.	Memerlukan ruang yang lebih besar untuk instalasi.
4.	Biaya instalasi dan operasi lebih sedikit.	Biaya instalasi dan operasi lebih besar.
5.	Menghidupkan turbin lebih mudah dan cepat.	Menghidupkan turbin (start) lebih susah dan membutuhkan waktu yang lama.
6.	Pengontrolan, dengan kondisi beban yang berubah, lebih mudah.	Pengontrolan, dengan beban yang berubah, susah.
7.	Turbin gas tidak bergantung pada suplai air.	Turbin uap bergantung pada suplai air.
8.	Efisiensinya rendah.	Efisiensinya lebih tinggi.

Klasifikasi Turbin Gas

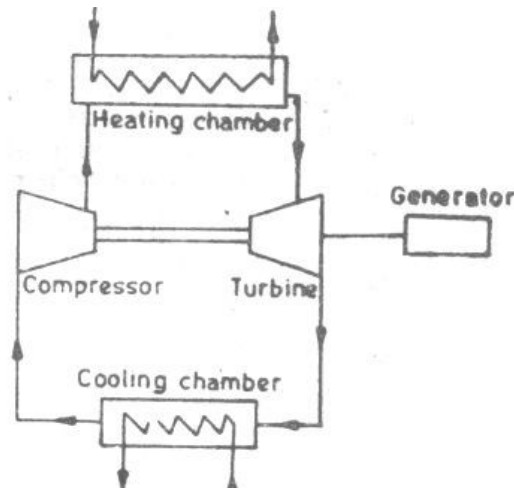
Turbin gas bisa diklasifikasikan dengan banyak cara, berikut ini beberapa klasifikasi turbin gas:

1. Berdasarkan lintasan fluida kerja:
 - (a) turbin gas siklus tertutup,
 - (b) turbin gas siklus terbuka, dan
 - (c) turbin gas setengah tertutup.

2. Berdasarkan proses penyerapan panas:

- (a) turbin gas tekanan konstan dan
- (b) turbin gas volume konstan.

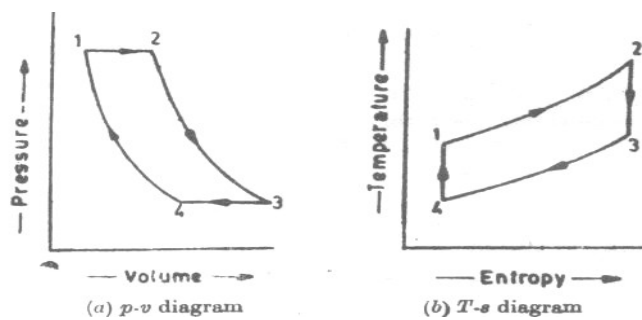
Turbin Gas Siklus Tertutup



Gambar 1: Skema susunan turbin gas siklus tertutup

Turbin gas siklus tertutup terdiri dari sebuah kompresor, ruang pemanas (heating chamber), turbin gas yang menggerakkan generator dan kompresor, dan ruang pendingin (cooling chamber). Gambar skematik turbin gas siklus tertutup diperlihatkan oleh gambar 1. Pada turbin ini, udara dikompresi secara adiabatik (umumnya dengan kompresor rotari) dan diteruskan ke ruang pemanas. Udara kompresi dipanaskan dengan bantuan sumber eksternal, dan dialirkan ke sudu turbin (biasanya jenis reaksi). Gas ketika mengalir di sudu akan berekspansi. Dari turbin, gas diteruskan ke ruang pendingin dimana didinginkan pada tekanan konstan dengan bantuan sirkulasi air sampai temperatur awal.

Turbin gas siklus tertutup bekerja berdasarkan siklus Joule seperti yang diperlihatkan Gambar 2.



Gambar 2: Turbin gas siklus tertutup tekanan konstan.

Proses 1-2 memperlihatkan pemanasan udara di dalam ruang pemanas pada tekanan konstan. Proses 2-3 memperlihatkan ekspansi isentropik udara di dalam turbin. Proses 3-4 memperlihatkan pendinginan udara pada tekanan konstan di ruang pendingin. Terakhir, proses 4-1 memperlihatkan kompresi isentropik udara di kompresor.

Kerja yang dilakukan turbin per kg udara:

$$W_t = C_p (T_2 - T_3) \quad (\text{i})$$

Dan kerja yang diperlukan kompresor per kg udara:

$$W_c = C_p (T_1 - T_4) \quad (\text{ii})$$

Kerja netto yang tersedia:

$$W = W_t - W_c$$

Contoh Soal

Pada sebuah instalasi turbin gas berbahan bakar minyak, udara diambil pada tekanan 1 bar dan temperatur 27^o C dan dikompresi hingga tekanan 4 bar. Minyak dengan nilai kalor 42.000 kJ/kg dibakar di dalam ruang bakar untuk menaikkan temperatur udara hingga 550^o C. Jika udara mengalir dengan laju 1,2 kg/s, carilah daya netto dari instalasi tersebut. Cari juga rasio udara-bahan bakar. Ambil $C_p = 1,05$.

Jawab

Diketahui: $p_3 = p_4 = 1$ bar

$$T_4 = 27^{\circ} \text{C} = 300^{\circ} \text{K}$$

$$p_1 = p_2 = 4 \text{ bar}$$

$$\text{Nilai kalor minyak} = 42.000 \text{ kJ/kg}$$

Temperatur udara setelah pemanasan di dalam ruang bakar:

$$T_2 = 550^{\circ} \text{C} = 823^{\circ} \text{K}$$

$$m = 1,2 \text{ kg/s}$$

$$C_p = 1,05$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{823} = \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = (0,25)^{0,286} = 0,673$$

$$\square \quad T_3 = 823 \times 0,673 = 553,9^{\circ} \text{K}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{300}{T_1} = \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 0,673$$

$$\square \quad T_1 = 445,8^0 \text{ K}$$

Kerja yang dilakukan turbin:

$$W_t = m \cdot C_p (T_2 - T_3)$$

$$= 1,2 \times 1,05 (823 - 553,9) = 339,1 \text{ kJ/s}$$

dan kerja yang diberikan ke kompresor:

$$W_c = m \cdot C_p (T_1 - T_4)$$

$$= 1,2 \times 1,05 (445,8 - 300) = 183,7 \text{ kJ/s}$$

Maka daya netto instalasi:

$$= 339,1 - 183,7 = 154,4 \text{ kJ/s}$$

$$= 154,4 \text{ kW}$$

Rasio udara – bahan bakar:

Kalor yang diberikan oleh bahan bakar:

$$= m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 1,2 \times 1,05 (823 - 445,8)$$

$$= 475,3 \text{ kJ/s}$$

Berat bahan bakar terbakar/detik:

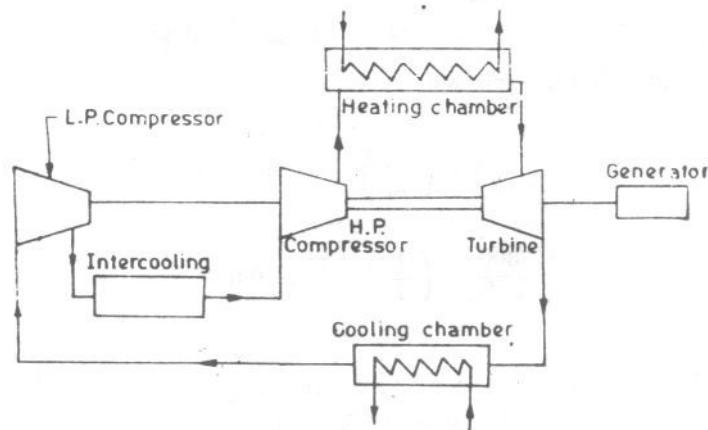
$$= \frac{\text{Kalor yang diberikan}}{\text{Nilai kalor}} = \frac{475,3}{42.000} = 0,011 \text{ kg/s}$$

dan rasio/perbandingan udara – bahan bakar:

$$= \frac{\text{Berat udara}}{\text{Berat bahan bakar}} = \frac{1,2}{0,011} = 109,1$$

Intercooling

Daya yang dihasilkan turbin sebagian besar digunakan oleh kompresor. Daya ini bisa diturunkan dengan mengkompresi udara secara dua tingkat dan menggunakan *intercooler* diantara kedua tingkat tersebut. Pengaturan secara skematik untuk *intercooler* diperlihatkan oleh gambar 3.

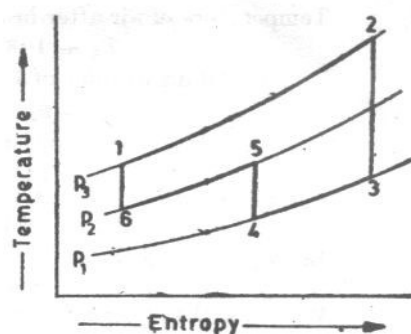


Gambar 3. Skema susunan intercooling pada turbin gas siklus tertutup.

Pertama-tama udara dikompresi di kompresor pertama, yang disebut “kompresor tekanan rendah” (LP kompresor). Karena kompresi ini, tekanan dan temperatur udara meningkat. Sekarang udara diteruskan ke *intercooler* (pendingin antara) yang akan menurunkan temperatur udara kompresi ke temperatur awal, tetapi tekanan tetap konstan. Setelah itu, udara kompresi sekali lagi dikompresi di kompresor kedua yang disebut sebagai “kompresor tekanan tinggi” (HP kompresor).

Sekarang udara kompresi diteruskan ke ruang pemanas dan kemudian ke turbin. Akhirnya udara didinginkan di ruang pendingin dan kembali di kompresi ke kompresor tekanan rendah.

Proses *intercooling* udara pada dua tingkat kompresi diperlihatkan dengan diagram *T-s* pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram *T-s* untuk intercooling.

Proses 1-2 menunjukkan pemanasan udara di ruang pemanas pada tekanan konstan. Proses 2-3 memperlihatkan ekspansi isentropik udara pada turbin. Proses 3-4 adalah pendinginan udara di ruang pendingin pada tekanan konstan. Proses 4-5 adalah kompresi

udara di LP kompresor. Proses 5-6 adalah pendinginan udara pada intercooler pada tekanan konstan. Terakhir, proses 6-1 adalah kompresi udara pada HP kompresor.

Kerja yang dilakukan turbin per kg udara:

$$W_t = C_p (T_2 - T_3) \quad (i)$$

Dan kerja yang dilakukan kompresor per kg udara:

$$W_c = C_p [(T_1 - T_6) + (T_5 - T_4)] \quad (ii)$$

Kerja netto yang tersedia:

$$W = W_t - W_c$$

Untuk pendinginan yang sempurna, tekanan antara bisa dicari dengan persamaan:

$$p_6 = p_5 = \sqrt{p_1 \times p_4} = \sqrt{p_2 \times p_3}$$

Contoh soal

Sebuah pembangkit turbin gas terdiri dari kompresor dua tingkat dengan pendinginan antara sempurna dan sebuah turbin satu tingkat. Jika pembangkit bekerja antara batas temperatur 300^0 K dan 1000^0 K dan tekanan 1 kg/cm^2 dan 16 kg/cm^2 , carilah daya netto pembangkit per kg udara. Ambil harga kalor spesifik pada tekanan konstan sebesar $0,24 \text{ kcal/kg} \cdot ^0\text{K}$.

Jawab

Diketahui: $T_4 = 300^0$ K

$$T_2 = 1000^0 \text{ K}$$

$$p_3 = p_4 = 1 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_1 = p_2 = 16 \text{ kg/cm}^2$$

$$C_p = 0,24 \text{ kcal/kg} \cdot ^0\text{K}$$

Pada pendinginan sempurna, tekanan antara:

$$p_6 = p_5 = \sqrt{p_1 \times p_4} = \sqrt{16 \times 1} = 4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{1000} = \left(\frac{1}{16} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 0,453$$

$$T_3 = 1000 \times 0,453 = 453^0 \text{ K}$$

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{300}{T_5} = \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 0,673$$

$$T_5 = 446^0 \text{ K}$$

Pada pendinginan sempurna :

$$T_1 = T_5 = 446^0 \text{ K}$$

sehingga:

$$\frac{T_6}{T_1} = \left(\frac{p_6}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_6}{446} = \left(\frac{4}{16} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 0,673$$

$$T_6 = 446 \times 0,673 = 300^0 \text{ K}$$

Kerja yang dilakukan turbin per kg udara:

$$\begin{aligned} W_t &= C_p (T_2 - T_3) = 0,24 (1000 - 453) \\ &= 131,3 \text{ kcal/sec} \end{aligned}$$

Dan kerja yang diserap oleh kompresor per kg udara:

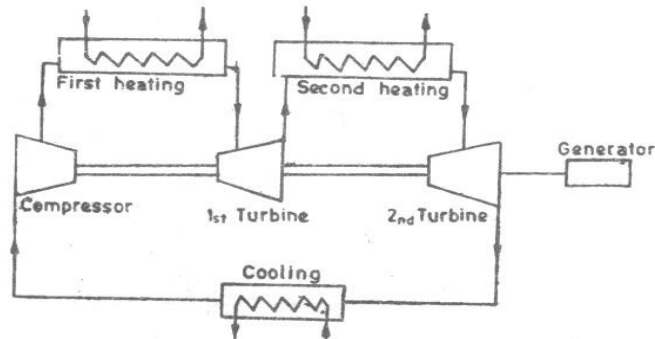
$$\begin{aligned} W_c &= C_p [(T_1 - T_6) + (T_5 - T_4)] \\ &= 0,24 [(446 - 300) + (446 - 300)] \\ &= 70,1 \text{ kcal/s} \end{aligned}$$

Kerja netto yang dilakukan pembangkit per kg udara:

$$\begin{aligned} W &= 131,3 - 70,1 = 61,2 \text{ kcal/s} \\ &= 61,2 \times 427 = 26.130 \text{ kg.m/s} \\ &= \frac{26.130}{75} = 348,4 \text{ hp} \end{aligned}$$

Reheating

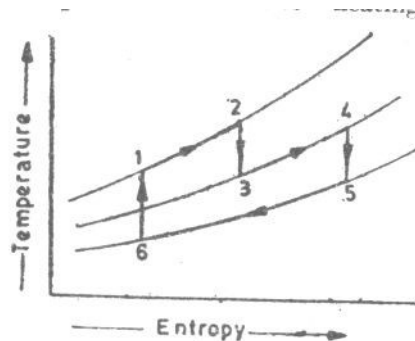
Output turbin gas bisa ditingkatkan secara berarti dengan mengembangkan udara panas dalam dua tingkat dengan *reheater* diantara dua tingkat. Gambar skematik untuk *reheat* diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5. Skema susunan turbin gas siklus tertutup dengan reheating.

Udara pertama-tama dikompresi dengan kompresor, dan diteruskan ke ruang pemanas, dan kemudian ke turbin pertama. Kemudian udara sekali lagi dilewatkan ke ruang pemanas yang lainnya dan kemudian dialirkan ke turbin kedua. Terakhir turbin didinginkan di ruang pendingin dan setelah itu diteruskan ke kompresor.

Proses pemanasan dua turbin diperlihatkan oleh diagram T - s pada gambar 6.



Gambar 6. Diagram T - s untuk reheating.

Proses 1-2 : pemanasan udara di ruang pemanas pertama pada tekanan konstan.

Proses 2-3 : ekspansi isentropik udara pada turbin pertama.

Proses 3-4 : pemanasan udara pada ruang pemanas kedua. Pada tekanan konstan.

Proses 4-5 : ekspansi isentropik udara pada turbin kedua.

Proses 5-6 : pendinginan udara pada *cooling chamber* pada tekanan konstan.

Proses 6-1 : kompresi udara pada kompresor.

Kerja yang dihasilkan turbin per kg udara:

$$W_t = C_p [(T_2 - T_3) + (T_4 - T_5)] \quad (i)$$

Kerja yang diperlukan kompresor per kg udara:

$$W_c = C_p (T_1 - T_6) \quad (\text{ii})$$

Kerja netto yang tersedia:

$$W = W_t - W_c$$

Untuk kerja maksimum, pemanasan harus dilakukan pada tekanan antara/intermediate :

$$p_3 = p_4 = \sqrt{p_2 \times p_5} = \sqrt{p_1 \times p_6}$$

Contoh soal

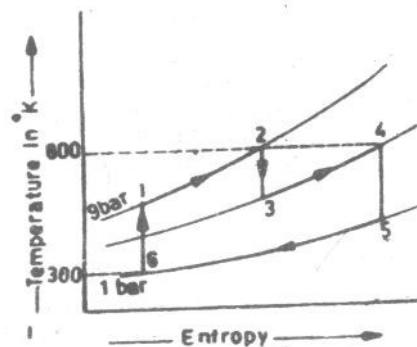
Pada sebuah pembangkit turbin gas, udara di kompresi oleh sebuah kompresor satu tingkat dari 1 bar hingga 9 bar dan dari temperatur awal 300°K . Udara yang sama kemudian dipanaskan hingga temperatur 800°K dan kemudian diekspansikan pada turbin. Udara kemudian dipanaskan kembali ke temperatur 800°K dan kemudian diekspansikan pada turbin kedua. Carilah daya maksimum yang didapatkan dari pembangkit, jika massa udara yang disirkulasikan per detiknya adalah 2 kg.

Jawab

Diketahui: $p_6 = p_5 = 1 \text{ bar}$

$$p_1 = p_2 = 9 \text{ bar}$$

$$T_6 = 300^{\circ}\text{K}$$



$$T_2 = T_4 = 800^{\circ}\text{K}$$

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$C_p = 1,0$$

$$p_3 = p_4 = \sqrt{p_1 \times p_6} = \sqrt{9 \times 1} = 3 \text{ bar}$$

$$\frac{T_1}{T_6} = \left(\frac{p_1}{p_6} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_1}{300} = \left(\frac{9}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,873$$

$$T_1 = 300 \times 1,873 = 562^0 \text{ K}$$

kemudian:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{800}{T_3} = \left(\frac{9}{3} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,369$$

$$T_3 = 584^0 \text{ K}$$

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{800}{T_5} = \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,369$$

$$T_5 = 584^0 \text{ K}$$

kerja yang dilakukan oleh turbin:

$$\begin{aligned} W_t &= m \cdot C_p [(T_2 - T_3) + (T_4 - T_5)] \\ &= 2 \times 1,0 [(800 - 584) + (800 - 584)] \\ &= 864 \text{ kJ/sec} \end{aligned}$$

dan kerja yang diserap oleh kompresor:

$$\begin{aligned} W_c &= m \cdot C_p (T_1 - T_6) \\ &= 2 \times 1,0 (562 - 300) \\ &= 526 \text{ kJ/sec} \end{aligned}$$

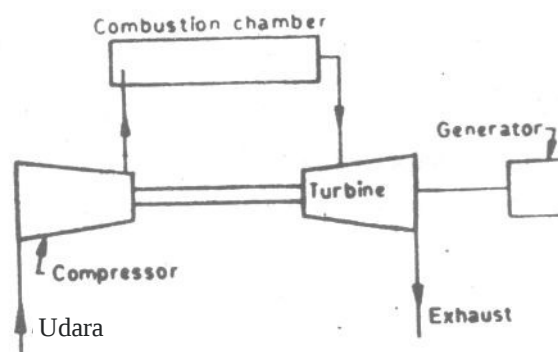
Daya yang diperoleh oleh pembangkit :

$$P = 864 - 526 = 338 \text{ kJ/s} = 338 \text{ kW}$$

Turbin Gas Siklus Terbuka

Turbin gas siklus terbuka, dalam bentuk yang paling sederhana, terdiri dari kompresor, ruang bakar (combustion chamber), dan sebuah turbin gas yang menggerakkan generator dan kompresor. Skema siklus ini bisa dilihat pada gambar 7.

Pertama-tama udara dihisap dari atmosfer dan dikompresi secara adiabatik (biasanya dengan kompresor rotari) dan diteruskan ke ruang bakar. Udara tekan dipanaskan dengan pembakaran bahan bakar dan hasil pembakaran (yaitu gas panas hasil pembakaran bahan bakar) akan bercampur dengan udara tekan, sehingga akan menaikkan massa udara tekan. Gas panas kemudian mengalir ke sudu turbin (biasanya jenis turbin reaksi). Gas ketika mengalir pada sudu mengalami ekspansi dan kemudian dibuang ke atmosfer.



Gambar 7. Skema susunan turbin gas siklus terbuka.

Turbin gas siklus terbuka disebut juga turbin gas pembakaran kontinu karena pembakaran bahan bakar terjadi secara kontinu. Turbin ini juga bekerja berdasarkan siklus Joule. Rumus kerja kompresor, kerja turbin sama dengan rumus pada turbin siklus tertutup.

Perbandingan Antara Turbin Gas Siklus Tertutup Dengan Siklus Terbuka

Berikut ini adalah perbandingan antara turbin gas siklus tertutup dengan siklus terbuka.

No.	Turbin Gas Siklus Tertutup	Turbin Gas Siklus Terbuka
1.	Udara tekan dipanaskan di ruang bakar. Karena gas dipanaskan oleh sumber eksternal, jumlah gas tetap sama.	Udara tekan dipanaskan di ruang bakar. Produk pembakaran bercampur dengan udara panas.
2.	Gas dari turbin diteruskan ke ruang	Gas dari turbin dibuang ke atmosfer.

	pendinginan.	
3.	Fluida kerja bersirkulasi secara kontinyu.	Fluida kerja diganti secara kontinyu.
4.	Fluida jenis apa saja dengan sifat termodinamika yang baik bisa digunakan.	Hanya udara yang bisa digunakan sebagai fluida kerja.
5.	Sudu turbin tidak cepat aus karena gas tidak terkontaminasi ketika melewati ruang bakar.	Sudu turbin cepat aus, karena udara dari atmosfer terkontaminasi ketika melewati ruang bakar.
6.	Karena fluida didinginkan dengan sirkulasi air, cocok digunakan untuk jenis instalasi stasioner atau di kapal.	Karena udara dari turbin dibuang ke atmosfer, cocok digunakan untuk kendaraan yang bergerak.
7.	Biaya perawatan tinggi.	Biaya perawatan rendah.
8.	Berat instalasi per daya (hp) lebih besar.	Berat instalasi per daya (hp) lebih kecil.

Contoh Soal

Sebuah pembangkit turbin gas siklus terbuka tekanan konstan bekerja antara temperatur 15°C dan 700°C dan rasio tekanan 6. Carilah massa udara yang bersirkulasi pada pembangkit, jika pembangkit tersebut menghasilkan daya 1.500 hp. Cari juga kalor yang diberikan pada ruang pemanas.

Jawab

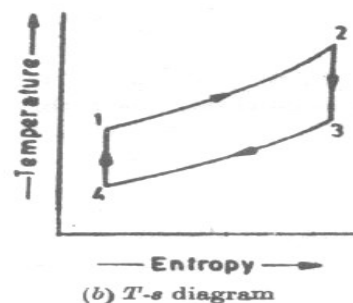
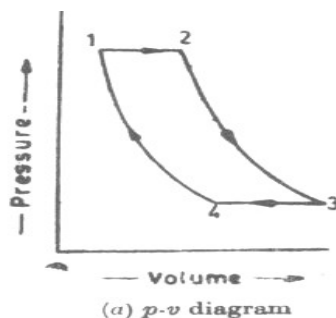
Diketahui: $T_4 = 15^{\circ}\text{C} = 288^{\circ}\text{K}$

$T_2 = 700^{\circ}\text{C} = 973^{\circ}\text{K}$

rasio tekanan, $p_2/p_3 = p_1/p_4 = 6$

$P = 1.500\text{ hp}$

a. Massa udara yang bersirkulasi pada pembangkit



$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{973} = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \left(\frac{1}{6}\right)^{0,286} = 0,599$$

$$T_3 = 973 \times 0,599 = 583^0 \text{ K}$$

selanjutnya:

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{288}{T_1} = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \left(\frac{1}{6}\right)^{0,286} = 0,599$$

$$T_1 = 481^0 \text{ K}$$

kerja turbin per kg udara:

$$\begin{aligned} W_t &= C_p (T_2 - T_3) = 0,24 (973 - 583) \text{ kcal/s} \\ &= 93,6 \text{ kcal/s} \end{aligned}$$

kerja yang diserap kompresor per kg udara:

$$\begin{aligned} W_c &= C_p (T_1 - T_4) = 0,24 (481 - 288) \text{ kcal/s} \\ &= 46,3 \text{ kcal/s} \end{aligned}$$

kerja netto turbin per kg udara:

$$\begin{aligned} &= 93,6 - 46,3 = 47,3 \text{ kcal/kg-s} \\ &= 47,3 \times J = 47,3 \times 427 = 20.197 \text{ kg-m/kg-s} \end{aligned}$$

dan daya yang dihasilkan oleh pembangkit:

$$\begin{aligned} 1500 \times 75 &= \dot{m} (20.197) \\ \dot{m} &= 5,57 \text{ kg} \end{aligned}$$

b. Kalor yang displai ke ruang pemanasan

$$\begin{aligned} Q &= m.C_p (T_2 - T_1) \\ &= 5,57 \times 0,24 (973 - 481) \text{ kcal/s} \\ &= 657,7 \text{ kcal/s} \end{aligned}$$

Efisiensi Turbin

Efisiensi Keseluruhan (termal) :

η_{th} = efisiensi termal

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

dimana : $r =$ rasio tekanan

$$= p_1/p_4 = p_2/p_3$$

Contoh soal

Pada sebuah instalasi turbin gas, udara diambil pada tekanan 1 bar dan temperatur 30°C . Udara dikompresi hingga 4 bar dan kemudian dipanaskan dengan membakar minyak hingga temperatur 500°C . Jika udara mengalir dengan laju 90 kg/min, carilah daya dan efisiensi keseluruhan yang dihasilkan oleh pembangkit. Ambil γ udara 1,4 dan $C_p = 1,0$, Laju aliran massa bahan bakar 2,4 kg/min, nilai kalor bahan bakar = 40.000 kJ/kg

Jawab

Diketahui: $p_4 = p_3 = 1 \text{ bar}$

$$T_4 = 30^\circ \text{C} = 303^\circ \text{K}$$

$$p_1 = p_2 = 4 \text{ bar}$$

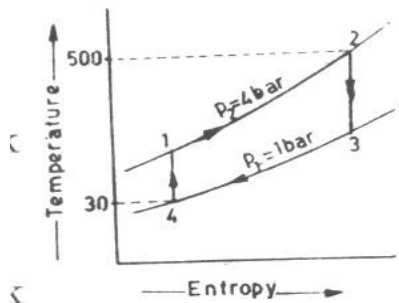
$$T_2 = 500^\circ \text{C} = 773^\circ \text{K}$$

$$m_a = 90 \text{ kg/min} = 1,5 \text{ kg/s}$$

$$\gamma = 1,4 \text{ dan } C_p = 1,0$$

$$\text{massa bahan bakar} = m_f = 2,4 \text{ kg/min} = 0,04 \text{ kg/s}$$

$$\text{Nilai kalor bahan bakar} = CV = 40.000 \text{ kJ/kg}$$



Daya yang dihasilkan pembangkit

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{773} = \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \left(\frac{1}{4} \right)^{0,286} = 0,673$$

$$T_3 = 773 \times 0,673 = 520^\circ \text{K}$$

selanjutnya:

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{303}{T_1} = \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \left(\frac{1}{4} \right)^{0,286} = 0,673$$

$$T_1 = 450^0 \text{ K}$$

Kerja yang dibangkitkan turbin:

$$\begin{aligned} W_t &= m \cdot C_p (T_2 - T_3) = 1,5 \times 1,0 (773 - 520) \\ &= 379,5 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

kerja yang diperlukan oleh kompresor:

$$\begin{aligned} W_c &= m \cdot C_p (T_1 - T_4) = 1,5 \times 1,0 (450 - 303) \\ &= 220,5 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

kerja netto turbin per kg udara:

$$\begin{aligned} P &= 379,5 - 220,5 = 159 \text{ kJ/s} \\ &= 159 \text{ kW} \end{aligned}$$

Efisiensi keseluruhan pembangkit

kalor yang disuplai per detik:

$$\begin{aligned} &= m_f \cdot CV \\ &= 0,04 \times 40.000 \\ &= 1.600 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

efisiensi keseluruhan:

$$\begin{aligned} \eta_o &= \frac{159}{1600} = 0,099 \\ &= 9,9 \% \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Sebutkan perbedaan antara turbin gas dan turbin uap.
2. Coba sebutkan klasifikasi dari turbin gas.
3. Jelaskan perbedaan antara turbin gas siklus terbuka dengan turbin gas siklus tertutup.
4. Sebuah turbin gas siklus tertutup sederhana menerima udara pada 1 kg/cm^2 abs dan 15°C ; dan mengkompresinya ke tekanan 5 kg/cm^2 abs dan kemudian di panaskan hingga temperatur 800°C di ruang bakar. Udara panas berekspansi ke turbin hingga tekanan kembali ke 1 kg/cm^2 abs. Hitunglah daya yang dihasilkan per kg udara yang disuplai per detik. Ambil C_p untuk udara 0,24.
5. Sebuah instalasi turbin gas siklus tertutup sederhana bekerja antara batas temperatur 300° dan 1000°K dan batas tekanan adalah 1 kg/cm^2 dan 5 kg/cm^2 . Jika 1,25 kg udara bersirkulasi per detik, hitunglah daya yang dihasilkan turbin. Ambil $C_p = 0,24$ dan $\gamma = 1,4$.
6. Sebuah pembangkit gas turbin terdiri dari 2 tingkat kompresor (dengan pendingin antara sempurna) dan sebuah turbin. Pembangkit menerima udara pada 1 bar dan 290°K . Jika tekanan dan temperatur maksimum adalah 12,25 bar dan 950°K , carilah daya yang dihasilkan oleh pembangkit per kg udara. Ambil harga kalor spesifik pada tekanan konstan 1,0.
7. Pada instalasi gas turbin, udara di kompresi oleh kompresor satu tingkat dari 1 kg/cm^2 ke $6,25 \text{ kg/cm}^2$ dan dari temperatur awal 20°C . Udara setelah kompresi dipanaskan di ruang bakar hingga temperatur 750°C . Udara panas berekspansi pada turbin dan kemudian dipanaskan kembali (reheat) hingga temperatur 750°C . Udara panas kembali berekspansi di turbin kedua. Carilah daya yang dihasilkan per kg udara.
8. Sebuah turbin gas menerima udara pada 1 bar dan 20°C . Carilah efisiensi termal pembangkit, jika rasio kompresi 4 dan kalor spesifik pada tekanan konstan dari fluida kerjanya adalah 1,0.

BAB 6

TURBIN AIR

A. TURBIN IMPULS

Turbin impuls adalah turbin dimana gerakannya disebabkan oleh adanya impuls dari air. Pada turbin impuls, air dari sebuah bendungan dialirkan melalui pipa, dan kemudian melewati mekanisme pengarah dan akhirnya melewati nosel. Pada proses tersebut energi yang tersedia dikonversikan ke energi kinetik, dengan melewatkannya pada nosel, yang dekat sekali dengan *runner*. Air memasuki roda yang bergerak dalam bentuk semburan yang menumbuk mangkok, yang terpasang pada lingkaran luar roda turbin.

Semburan air menumbuk mangkok dengan kecepatan tinggi, dan setelah mengalir pada sudu (*vane*), keluar dengan kecepatan rendah. Tekanan air pada sisi masuk dan keluar adalah tekanan atmosfer. Contoh turbin impuls yang paling umum adalah **Roda Pelton** yang akan dibicarakan berikut ini.

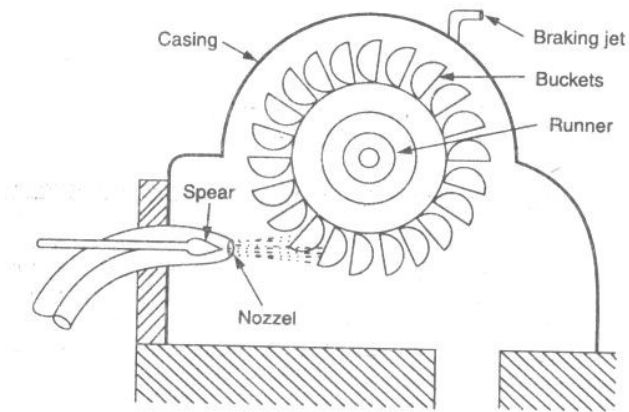
Roda Pelton

Turbin/Roda Pelton adalah turbin impuls yang digunakan untuk tekanan *head* yang tinggi dari air. Komponen-komponen utamanya adalah :

1. Nosel.
2. *Runner* dan mangkok.
3. Semburan pengerem.

Nosel

Adalah mekanisme pengarah, yang mengarahkan air supaya mengalir ke arah yang diinginkan, dan juga untuk mengatur aliran air. Air ini dalam bentuk semburan akan menumbuk mangkok (*bucket*). Jarum konis atau tombak (*spear*) bekerja di dalam nosel dalam arah aksial. Tujuan utama jarum ini adalah untuk mengatur jumlah air yang mengalir pada nosel seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Komponen-komponen Roda Pelton

Jika jarum didorong ke depan, akan mengurangi luas semburan. Akibatnya, jumlah air yang mengalir pada semburan juga akan berkurang. Demikian juga, jika jarum bergerak ke belakang akan memperbesar jumlah air ke semburan. Nosel dibuat sedemikian dekat dengan mangkok, untuk meminimalkan kerugian karena angin.

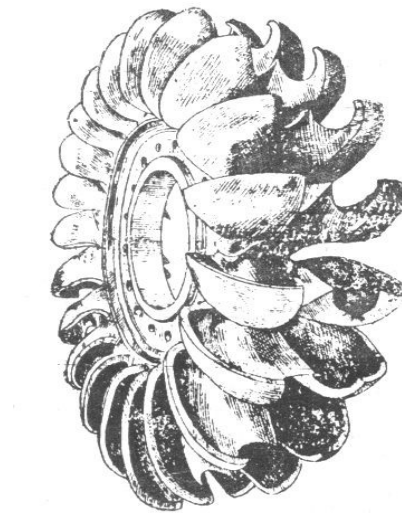
Runner dan Mangkok

Runner pada roda Pelton pada prinsipnya terdiri dari piringan berbentuk lingkaran yang dipasang pada poros horisontal. Pada lingkaran luar *runner* dipasang mangkok secara merata. Gambar *runner* bisa dilihat pada gambar 2.

Permukaan mangkok dibuat sangat halus. Untuk *head* rendah, mangkok dibuat dari besi tuang. Untuk *head* tinggi, mangkok dibuat dari perunggu, baja tahan karat atau paduan lainnya. Jika air secara kimia tidak murni, mangkok dibuat dari paduan khusus. Mangkok umumnya dibaut ke *runner*, tetapi kadang-kadang mangkok dan piringan dibuat dalam bentuk tunggal.

Rumah Turbin (casing)

Rumah roda Pelton tidak mempunyai fungsi hidrolis. Tetapi diperlukan untuk melindungi *runner* dari kecelakaan, dan juga mencegah cipratan air serta mengarahkan air ke pembuangan.



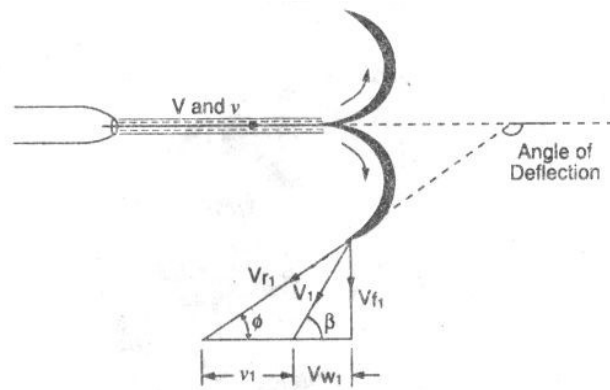
Gambar 2. Runner roda Pelton.

Semburan Pengerem

Ketika turbin ingin dihentikan, nosel ditutup. Namun *runner* tidak langsung berhenti melainkan akan berputar beberapa waktu karena pengaruh kelembaman. Supaya *runner* berhenti dalam waktu sesingkatnya, nosel kecil dipasang sedemikian sehingga akan menyemburkan air pada sisi belakang mangkok. Semburan ini berfungsi sebagai pengerem yang akan mengurangi kecepatan *runner*.

Kerja Pada Turbin Impuls

Semburan air yang keluar dari nosel, menabrak mangkok pada bagian pemecahnya (splitter). Pemecah kemudian membagi aliran menjadi dua bagian, Satu semburan akan mengalir dipermukaan dalam bagian sudu pertama dan keluar pada sisi ekstrimnya. Bagian yang lain akan mengalir di bagian sudu yang kedua dan keluar pada sisi ekstrim sudu tersebut seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Segitiga Kecepatan.

Dari gambar terlihat, bahwa titik tengah mangkok, dimana semburan menabrak pemecah dan terbagi dua, terdiri dari satu sisi masuk dan dua sisi keluar sehingga semburan terbagi menjadi dua.

Segitiga Kecepatan

Pertama-tama gambarlah segitiga kecepatan pada pemecah (yang hanya berupa garis lurus) dan pada salah satu sisi ujung keluar seperti diperlihatkan gambar 3, dimana:

V = kecepatan absolut air masuk

V_r = kecepatan relatif air dan mangkok pada sisi masuk

V_f = Kecepatan aliran pada sisi masuk

V_w = kecepatan pusar pada sisi masuk

v = kecepatan tangensial sudu

V_1, V_{r1}, V_{f1} = notasi yang sama untuk sisi keluar

D = diameter roda

d = diameter nosel

N = putaran roda, rpm

ϕ = sudut ujung sudu pada sisi keluar

H = head total air

Karena segitiga kecepatan pada sisi masuk berupa garis lurus, sehingga kecepatan pusar pada sisi masuk:

$$V_w = V \quad \text{dan} \quad V_r = V - v$$

Roda pelton mempunyai aliran aksial, sehingga :

$$v = v_1 \quad \text{atau} \quad V_{r1} = V_r = V - v$$

Dari segitiga sisi keluar, kita dapatkan kecepatan pusar:

$$V_{w1} = V_{r1} \cos \phi - v = (V - v) \cos \phi - v$$

Gaya per kg air:

$$= \frac{1}{g}(V_w - V_{w1})$$

Pada kondisi ini V_{w1} adalah negatif karena arahnya berlawanan dengan V_w . Karena itu gaya per kg air menjadi:

$$= \frac{1}{g}(V_w + V_{w1})$$

Dan kerja yang dilakukan per kg air:

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{g}(V_w v + V_{w1} v_1) \\ &= \frac{V_w v}{g} + \frac{V_{w1} v}{g} \\ &= \frac{V_w v}{g} + \frac{(V_1 \cos \phi - v) v}{g} \\ &= \frac{v}{g} \{V_w + [(V - v) \cos \phi - v]\} \\ &= \frac{v}{g} (V + V \cos \phi - v \cos \phi - v) \\ &= \frac{v}{g} [V(1 + \cos \phi) - v(1 + \cos \phi)] \\ &= \frac{v(V - v)(1 + \cos \phi)}{g} \end{aligned}$$

Efisiensi hidrolik:

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{v(V - v)(1 + \cos \phi)}{\frac{g}{2g}} \\ &= \frac{2v(V - v)(1 + \cos \phi)}{V^2} \end{aligned}$$

Untuk efisiensi maksimum bisa dicari dengan mendiferensialkan persamaan di atas terhadap v dan menyamakannya dengan nol, maka didapatkan efisiensi maksimum didapatkan pada kondisi:

$$v = \frac{V}{2}$$

Kerja maksimum/kg air menjadi:

$$= \frac{V^2}{4g}(1 + \cos \phi)$$

Efisiensi hidrolik maksimum:

$$\eta_{h\max} = \frac{\frac{V^2}{4g}(1 + \cos \phi)}{\frac{V^2}{2g}} = \frac{(1 + \cos \phi)}{2}$$

- Catatan : 1. Perlu dicatat bahwa efisiensi maksimum pada harga $\cos \phi = 1$ yaitu $\phi = 180^\circ$. Tetapi pada kondisi nyata, semburan dibelokkan hanya pada sudut 160° hingga 165° . Sebab, jika semburan dibuat pada sudut 180° , air keluar dari satu mangkok akan menghasilkan impak pada mangkok didepannya.
2. Pada kondisi nyata, efisiensi maksimum terjadi jika kecepatan roda 0,46 kali kecepatan semburan.

Daya Yang Dihasilkan Turbin Impuls

$$P = \frac{wQH}{75} \quad (\text{hp})$$

Dalam SI:

$$P = g \cdot Q \cdot H = 9,81 Q \cdot H \quad (\text{kW})$$

Dimana : H = head air, m

Q = debit air, m^3/s

g = gravitasi, m/s^2

Efisiensi Keseluruhan

$$\eta_o = \frac{P}{\frac{wQH}{75}}$$

Dalam SI:
$$\eta_o = \frac{P}{gQH}$$

Contoh soal

Sebuah roda Pelton menghasilkan daya 2000 kW pada head 100 meter dan efisiensi keseluruhan 85%. Carilah diameter nosel, jika koefisien kecepatan nosel 0,98.

Jawab

Diketahui: $P = 2000$ kW

$$H = 100 \text{ m}$$

$$\eta_o = 85\% = 0,85$$

$$C_v = 0,98$$

Kecepatan jet:

$$V = C_v \sqrt{2gH} = 0,98 \sqrt{2 \times 9,81 \times 100} = 43,3 \text{ m/s}$$

Efisiensi keseluruhan, η_o :

$$0,85 = \frac{P}{gQH} = \frac{2000}{9,81 \cdot Q \cdot 100} = \frac{2,04}{Q}$$

$$Q = 2,04 / 0,85 = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit total harus sama dengan debit yang melalui jet, maka:

$$Q = V \cdot A$$

$$Q = V \times \frac{\pi}{4} \times (d)^2$$

$$2,4 = 43,3 \frac{\pi}{4} \times (d)^2 = 34,1 d^2$$

$$d^2 = 2,4 / 34,1 = 0,0704$$

$$d = \sqrt{0,0704} = 0,265 \text{ m} = 265 \text{ mm}$$

Contoh soal

Sebuah roda Pelton bekerja pada head 500 m, menghasilkan daya 13.000 kW pada 430 rpm.

Jika efisiensi roda 85%, carilah (a) Debit turbin, (b) diameter roda, dan (c) diameter nozel.

Asumsikan data-data yang diperlukan.

Jawab

Diketahui: $H = 500$ m; $P = 13.000$ kW; $N = 430$ rpm dan $\eta_o = 85\% = 0,85$

(a) Debit turbin,

$$\eta_o = \frac{P}{wQH} = \frac{13.000.000}{9,81 \times 1000 \times Q \times 500} = \frac{2,65}{Q}$$

$$Q = 2,65 / 0,85 = 3,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

(b) Diameter roda,

Diasumsikan koefisien kecepatan, $C_v = 0,98$ dan kecepatan tangensial roda, $v = 0,46V$ (V adalah kecepatan jet).

$$V = C_v \sqrt{2gH} = 0,98 \sqrt{2 \times 9,81 \times 500} = 97,1 \text{ m/s}$$

$$v = 0,46 V = 0,46 \times 97,1 = 44,7 \text{ m/s}$$

Diameter roda:

$$v = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi D \times 430}{60} = 22,5 D$$

$$D = 44,7 / 22,5 = 2,0 \text{ m}$$

(c) diameter nosel:

$$Q = V \frac{\pi}{4} (d)^2$$

$$3,12 = 97,1 \frac{\pi}{4} (d)^2 = 76,3 (d)^2$$

$$d^2 = 3,12 / 76,3 = 0,041 \text{ atau}$$

$$d = 0,2 \text{ m} = 200 \text{ mm}$$

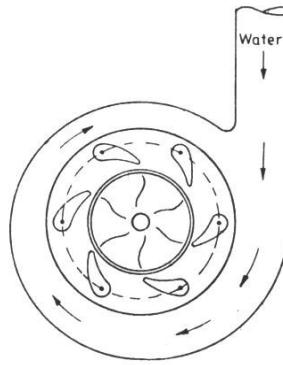
B. TURBIN REAKSI

Komponen-komponen Utama

1. Rumah turbin spiral.
2. Mekanisme pengarah.
3. Runner turbin
4. Draft tube.

Rumah Turbin Spiral

Air dari saluran pipa didistribusikan di sekeliling cincin rumah turbin. Rumah turbin didesain sedemikian sehingga luas penampang melintangnya berkurang secara seragam. Luas penampang melintangnya maksimum pada sisi masuk dan minimum pada ujung seperti diperlihatkan gambar 4. Karenanya bentuk rumah turbin seperti spiral sehingga disebut *rumah turbin spiral* atau *rumah scroll*.



Gambar 4. Rumah turbin reaksi.

Material rumah turbin tergantung pada *head* air :

- Beton : head hingga 30 m
- Pelat baja rol dilas : head hingga 100 m
- Baja cor : head lebih dari 100 m

Mekanisme Pengarah

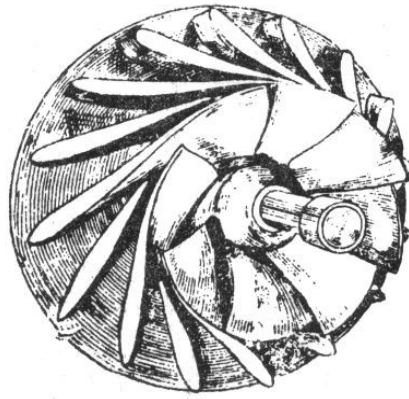
Sudu pengarah (*guide vane*) terpasang tetap diantara dua cincin dalam bentuk roda. Roda ini dipasang tetap pada rumah turbin spiral. Sudu pengarah didesain untuk:

1. Supaya air masuk ke *runner* tanpa kejut.
2. Supaya air mengalir tanpa membentuk arus *Eddy*.
3. Supaya sejumlah air bisa memasuki turbin.

Sudu pengarah bisa dibuka dan ditutup dengan memutar poros pengatur, sehingga jumlah air bisa diatur sesuai keperluan. Poros pengatur dioperasikan dengan menggunakan *governor*, yang fungsinya mengatur turbin (yaitu menjaga kecepatan turbin konstan pada beban yang bervariasi).

Runner Turbin

Runner terdiri dari sudu yang terpasang tetap pada poros atau cincin. Sudu didesain supaya air masuk dan meninggalkan turbin tanpa kejut.



Gambar 5. Runner Turbin Reaksi.

Runner terpasang pada poros. Jika porosnya vertikal, disebut turbin vertikal, dan jika poros horisontal maka disebut turbin horisontal. Untuk *head* rendah, *runner* bisa dibuat dari besi tuang, tetapi untuk *head* tinggi, *runner* dibuat dari baja atau paduan. Jika air secara kimia tidak murni, *runner* dibuat dari paduan spesial.

Draft Tube

Air setelah melewati *runner*, mengalir turun melalui pipa yang disebut *draft tube*. *Draft tube* mempunyai fungsi antara lain:

1. Meningkatkan *head* air sebesar tinggi *runner* dari permukaan air.
2. Meningkatkan efisiensi turbin.

Perbedaan Antara Turbin Impuls Dan Turbin Reaksi

Berikut ini beberapa hal tentang perbandingan antara turbin impuls dan turbin reaksi.

No.	Turbin Impuls	Turbin Reaksi
1.	Energi air yang tersedia pertama-tama dirubah ke energi kinetik.	Energi air yang tersedia tidak dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya.
2.	Air mengalir melalui nosel dan menumbuk sudu bergerak yang terpasang tetap pada sisi lingkaran luar roda.	Air diarahkan oleh sudu pengarah untuk mengalir pada sudu bergerak.
3.	Air menumbuk mangkok dengan energi kinetik.	Air meluncur pada sudu bergerak dengan energi tekanan.
4.	Tekanan air yang mengalir tetap, dan sama dengan tekanan atmosfer.	Tekanan air berubah setelah melalui sudu.
5.	Tidaklah terlalu penting roda berputar penuh. Lebih jauh, harus ada akses bebas udara antara sudu dan roda.	Adalah penting roda selalu berputar penuh, dan penuh dengan air.
6.	Air boleh mengalir di keseluruhan atau hanya dibagian atau di keseluruhan lingkaran roda.	Air mesti mengalir di keseluruhan roda.

7.	Memungkinkan mengatur aliran tanpa adanya kerugian.	Tidak mungkin mengatur aliran tanpa adanya kerugian.
8.	Kerja yang dilakukan hanya oleh perubahan energi kinetik semburan.	Kerja yang dilakukan sebagian karena perubahan head kecepatan, tetapi hampir sebagian besar karena perubahan head tekanan.

Klasifikasi Turbin Reaksi

Turbin reaksi bisa diklasifikasikan ke dalam tiga jenis, tergantung pada arah aliran air melewati roda:

1. Turbin aliran radial.
2. Turbin aliran aksial.
3. Turbin aliran campuran.

Turbin Aliran Radial

Pada turbin ini, aliran air adalah radial (yaitu sepanjang jari-jari roda). Turbin aliran radial lebih jauh bisa dibagi atas dua kelas:

1. Turbin aliran ke dalam (*inward*) : Pada turbin ini, air memasuki roda pada lingkaran luar dan mengalir ke dalam (yaitu menuju pusat roda).
2. Turbin aliran keluar (*outward*) : Pada turbin ini, air masuk pada pusat roda, dan kemudian mengalir ke arah luar (yaitu menuju lingkaran luar roda).

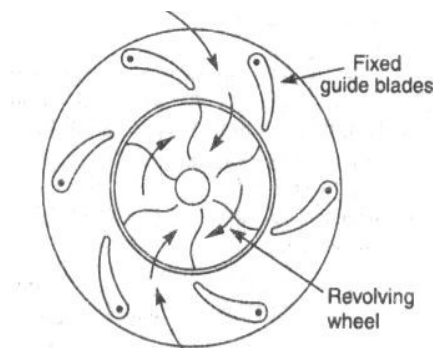
Turbin Aliran Aksial

Pada turbin ini, air mengalir sejajar/paralel terhadap sumbu roda. Turbin ini disebut juga *turbin aliran paralel*.

Turbin Aliran Campuran

Pada turbin ini, sebagian aliran adalah radial dan sebagian lainnya adalah aksial.

Turbin Reaksi Aliran Ke Dalam

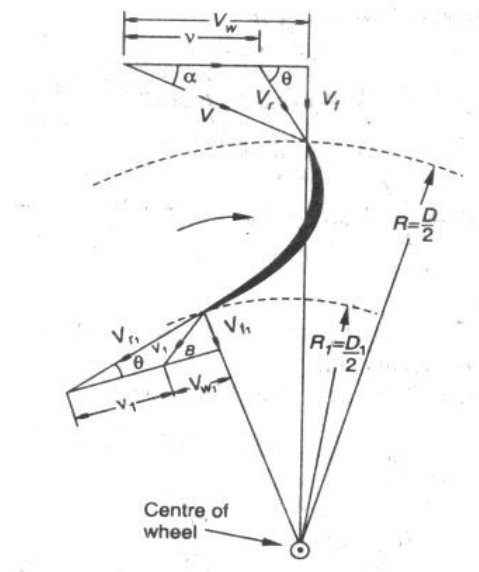


Gambar 6. Turbin reaksi aliran ke dalam.

Turbin reaksi aliran ke dalam (*inward*), adalah turbin reaksi dimana air memasuki roda pada bagian lingkaran luar dan mengalir menuju ke dalam melalui sudu (yaitu menuju pusat

roda) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6. Turbin reaksi ini terdiri dari sudu pengarah/tetap, yang mengarahkan air ke roda bergerak dengan sudut yang benar. Air ketika mengalir pada sudu/vane, menghasilkan gaya ke roda. Gaya ini menyebabkan roda berputar.

Perlu dicatat bahwa ketika beban turbin turun, akan menyebabkan poros akan berputar lebih cepat. Gaya sentrifugal akan meningkat karena putaran yang lebih tinggi, dan akan menurunkan jumlah air yang mengalir pada sudu, sehingga kecepatan air pada sisi masuk juga menurun. Pada akhirnya daya turbin akan berkurang. Ini adalah keuntungan turbin reaksi aliran *inward*, dimana akan mengatur sendiri sesuai dengan beban yang diperlukan. Efisiensi paling tinggi diperoleh ketika kecepatan air keluar sekecil mungkin.



Gambar 7. Segitiga kecepatan untuk turbin reaksi aliran ke dalam.

Gambar 7 menggambarkan segitiga kecepatan air pada sisi masuk dan keluar dimana:

D = diameter luar roda

N = jumlah putaran roda per menit

V = Kecepatan absolut uap memasuki sudu

v = kecepatan tangensial roda pada sisi masuk

$$= \frac{\pi DN}{60} \text{ m/s}$$

V_r = Kecepatan relatif air terhadap roda pada sisi masuk

V_f = Kecepatan aliran memasuki sudu bergerak

V_w = Kecepatan pusar pada sisi masuk sudu bergerak

α = Sudut air memasuki roda (disebut juga sudut sudu pengarah)

β = sudut air meninggalkan roda

θ = Sudut masuk sudu

ϕ = Sudut sudu pada sisi keluar

$V_1, D_1, v_1, V_{r1}, V_{f1}$ = Besaran yang sama untuk sisi keluar sudu.

H = head total air

W = berat air yang memasuki roda, kg/s

Dari segitiga kecepatan pada sisi masuk, diperoleh:

$$V_w = V \cos \alpha$$

Dan $V_f = V \sin \alpha$

Dan dari segitiga kecepatan sisi keluar diperoleh:

$$V_{w1} = V_1 \cos \alpha$$

Dan $V_{f1} = V_1 \sin \alpha$

- Gaya per kg air:

$$= \frac{1}{g} (V_w + V_{w1})$$

dalam hal ini V_{w1} adalah negatif

- Kerja per kg air:

$$= \frac{1}{g} (V_w \cdot v - V_{w1} \cdot v_1) = \frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w1} v_1}{g}$$

Catatan : 1. Jika tidak ada kerugian energi maka:

$$\frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w1} \cdot v_1}{g} = H - \frac{v_1^2}{2g}$$

2. Jika pembuangan air radial maka:

$$\beta = 90^\circ; \quad V_{w1} = 0 \quad \text{dan} \quad V_1 = V_{f1}$$

kerja yang dilakukan per kg air :

$$= \frac{V_w \cdot v}{g}$$

dan :

$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{v_1^2}{2g} = H - \frac{V_{f1}^2}{2g}$$

3. Jika sudu adalah radial pada sisi masuk, sisi keluar atau kedua-duanya, kemudian kecepatan pusat pada ujung sudu adalah nol.

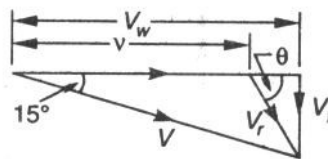
Contoh soal

Sebuah turbin reaksi aliran ke dalam, mempunyai diameter eksternal sebesar 1,5 meter dan bekerja pada putaran 400 rpm. Kecepatan aliran pada sisi masuk adalah 10 m/s. Jika sudut sudu pengarah 15° , carilah (a) kecepatan absolut air, (b) kecepatan pusar pada sisi masuk, (c) sudut sudu sisi masuk runner, dan (d) kecepatan relatif pada sisi masuk.

Jawab

Diketahui: $D = 1,5 \text{ m}$; $N = 400 \text{ rpm}$; $V_f = 10 \text{ m/s}$; dan $\alpha = 15^\circ$

(a) Kecepatan absolut air:



Dari segitiga kecepatan, diperoleh kecepatan absolut air:

$$V = \frac{V_f}{\sin 15^\circ} = \frac{10}{0,2588} = 38,64 \text{ m/s}$$

(b) kecepatan pusar pada sisi masuk:

Dari segitiga kecepatan, diperoleh kecepatan pusar sisi masuk:

$$V_w = V \cos 15^\circ = 38,64 \times 0,9659 = 37,32 \text{ m/s}$$

(c) Sudut sudu runner sisi masuk:

$$v = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi \times 1,5 \times 400}{60} = 31,42 \text{ m/s}$$

$$\tan \theta = \frac{V_f}{V_w - v} = \frac{10}{37,32 - 31,42} = 1,695 \quad \text{atau} \quad \theta = 59,5^\circ$$

(d) Kecepatan relatif pada sisi masuk:

Dari segitiga kecepatan, bisa dicari kecepatan relatif pada sisi masuk:

$$V_r = \frac{V_f}{\sin 59,5^\circ} = \frac{10}{0,8616} = 11,61 \text{ m/s}$$

Contoh soal

Sebuah turbin reaksi aliran ke dalam mendapat suplai air dengan laju 600 lt/s dengan kecepatan aliran 6 m/s. Kecepatan keliling dan kecepatan pusar pada sisi masuk masing-masing adalah 24 m/s dan 18 m/s. Diasumsikan sisi keluar aliran adalah radial, dan kecepatan aliran konstan, carilah:

(1) sudut sudu sisi masuk

(2) head air pada turbin

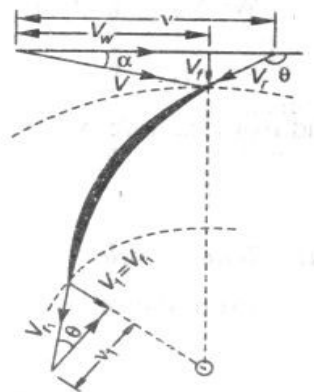
Jawab

Diketahui: $Q = 600 \text{ lt/s} = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$; $V_f = 6 \text{ m/s}$; $v = 24 \text{ m/s}$; $V_w = 18 \text{ m/s}$ dan $V_{f1} = V_f$

(1) Sudut sudu sisi masuk:

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{6}{24 - 18} = 1,0$$

$$180^\circ - \theta = 45^\circ \text{ atau } \theta = 135^\circ$$



(2) Head air pada turbin:

$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{V_1^2}{2g}$$

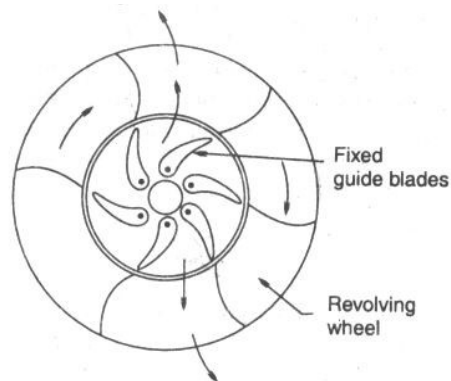
$$\frac{18 \times 24}{9,81} = H - \frac{V_{f1}^2}{2g}$$

$$44,0 = H - \frac{V_f^2}{2g} = H - \frac{(6)^2}{2 \times 9,81} = H - 1,8$$

$$H = 44 + 1,8 = 45,8 \text{ m}$$

Turbin Reaksi Aliran Ke Luar

Turbin reaksi aliran keluar adalah turbin reaksi dimana air masuk di tengah roda dan kemudian mengalir ke arah luar melalui sudu (gambar 8).



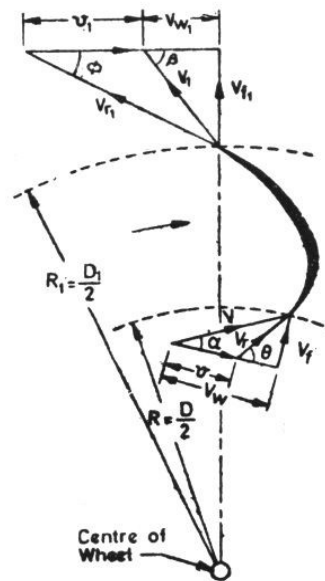
Gambar 8. Turbin reaksi aliran ke luar.

Turbin reaksi aliran ke luar terdiri dari sudu pengarah tetap, yang mengarahkan air ke roda berputar dengan sudut tertentu tanpa menimbulkan kejut. Air ketika menggelinding pada sudu akan menghasilkan gaya pada roda sehingga membuat roda berputar. Perbedaan antara turbin aliran ke dalam dan aliran ke luar adalah : pada aliran ke dalam, roda yang berputar berada di dalam sudu pengarah tetap, sedangkan pada turbin aliran ke luar, roda berada di luar sudu pengarah tetap.

Perlu dicatat bahwa ketika beban turbin turun, akan menyebabkan poros akan berputar lebih cepat. Gaya sentrifugal akan meningkat karena putaran yang lebih tinggi, dan akan menaikkan jumlah air yang mengalir pada sudu, sehingga roda akan berputar makin cepat dan makin cepat. Ini adalah kerugian yang dipunyai oleh turbin reaksi aliran keluar. Karena itu turbin ini harus diatur dengan menggunakan *governor* turbin.

Semua notasi pada turbin aliran keluar sama dengan turbin reaksi aliran ke dalam. Diameter dalam roda dilambangkan dengan D (diameter pada sisi masuk) dan diameter luar dinyatakan dengan D_1 (diameter pada sisi ke luar).

Efisiensi atau daya yang dihasilkan turbin bisa dicari dengan menggambar segitiga kecepatan sisi masuk dan sisi keluar seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9.



Gambar 9. Segitiga kecepatan untuk turbin reaksi aliran ke luar.

Contoh soal

Sebuah turbin reaksi aliran keluar mempunyai diameter dalam dan diameter luar berturut-turut 1 meter dan 2 meter. Air memasuki sudu pada sudut 20° dan meninggalkan sudu secara radial. Jika kecepatan aliran tetap konstan sebesar 10 m/s dan kecepatan roda 300 rpm, carilah sudut sudu pada sisi masuk dan keluar.

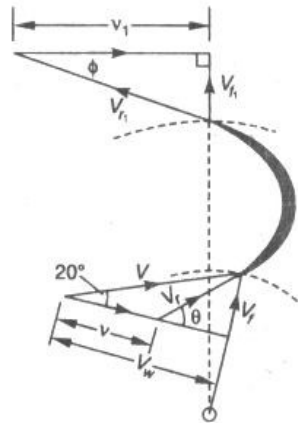
Jawab

Diketahui: $D = 1$ m; $D_1 = 2$ m; $\alpha = 20^\circ$; $V_f = V_{f1} = 10$ m/s dan $N = 300$ rpm.

Sudut sudu sisi masuk.

Kecepatan keliling pada sisi masuk:

$$v = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 1 \times 300}{60} = 15,71 \text{ m/s}$$



Dari segitiga kecepatan:

$$V_w = \frac{V_f}{\tan 20^\circ} = \frac{10}{0,364} = 27,5 \text{ m/s}$$

dan

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{V_f}{V_w - v} = \frac{10}{27,5 - 15,71} \\ &= 0,8482 \text{ atau } \theta = 40,3^\circ \end{aligned}$$

Sudut sisi keluar

$$v_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi \times 2 \times 300}{60} = 31,42 \text{ m/s}$$

dari segitiga kecepatan

$$\tan \phi = \frac{V_{fi}}{v_1} = \frac{10}{31,42} = 0,3183 \text{ atau } \phi = 17,7^\circ$$

Debit Pada Turbin Reaksi

Debit pada turbin reaksi bisa dicari dari energi yang disuplai atau dari kecepatan aktual aliran pada sisi masuk atau keluar, seperti akan dibicarakan berikut ini.

1. Dari energi yang diberikan ke turbin.

Jika : H = head air yang diberikan dalam meter

Q = debit air melalui turbin dalam m^3/s atau l/s

Maka Daya yang diberikan ke turbin:

$$= \frac{wQH}{75} \text{ hp}$$

Dalam SI:

$$\text{Daya} = wQH \text{ kW}$$

Q dalam m^3/s

2. Dari kecepatan aliran

Jika V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

D = diameter roda pada sisi masuk

b = lebar roda pada sisi masuk

Air memasuki roda :

$$Q = \pi D b V_f$$

Dengan cara yang sama, air keluar dari roda :

$$Q = \pi D_1 b_1 V_{f1}$$

Catatan : karena debit air memasuki roda sama dengan debit air meninggalkan roda sehingga:

$$D b V_f = D_1 b_1 V_{f1}$$

Daya Yang Dihasilkan Turbin Reaksi

Daya turbin :

$$P = \frac{wQH}{75} \text{ (hp)}$$

Dalam SI :

$$P = wQH = 9,81 QH \text{ (kW)}$$

$$w = 9,81 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

Efisiensi Turbin Reaksi

Secara umum, istilah efisiensi didefinisikan sebagai rasio kerja terhadap energi. Berikut ini adalah tiga jenis efisiensi turbin :

1. Efisiensi hidrolis.
2. Efisiensi mekanik.
3. Efisiensi keseluruhan.

1. Efisiensi hidrolis dirumuskan

$$\eta_h = \frac{\frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w1} \cdot v_1}{g}}{H}$$

Jika debit melalui roda adalah radial, maka kecepatan pusat pada sisi keluar adalah nol.

$$V_{w1} = 0$$

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{gH}$$

2. Efisiensi mekanik

Energi yang diberikan ke roda adalah :

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} wQ$$

dimana Q = debit turbin dalam m^3/s

Daya yang diberikan ke sudu :

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} \times \frac{wQ}{75} \text{ hp}$$

Jika P = daya yang tersedia pada turbin.

Sehingga :

$$\eta_m = \frac{P}{\frac{V_w \cdot v}{g} \times \frac{wQ}{75}} \quad P \text{ dalam hp}$$

dalam SI:

$$\eta_m = \frac{P}{\frac{V_w \cdot v}{g} wQ} \quad P \text{ dalam kW}$$

3. Efisiensi keseluruhan

$$\eta_o = \eta_h \times \eta_m = \frac{V_w \cdot v}{gH} \times \frac{P}{\frac{V_w \cdot v}{g} \times \frac{wQ}{75}}$$

$$\eta_o = \frac{P}{\frac{wQH}{75}}$$

dalam SI:

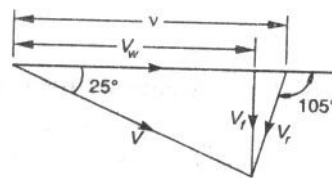
$$\eta_o = \frac{P}{wQH}$$

Contoh soal

Sebuah turbin reaksi aliran ke dalam, bekerja pada head 8 meter, mempunyai sudu pengarah dengan sudut 25° dan sudut sudu sisi masuk sebesar 105° . Dengan mengasumsikan kecepatan aliran konstan dan keluaran radial, carilah efisiensi hidrolis turbin.

Jawab

Diketahui: $H = 8 \text{ m}$; $\alpha = 25^\circ$; $\theta = 105^\circ$ dan $V_f = V_{f1}$



$$V_w = V \cos 25^\circ = 0,9063 V$$

$$\text{dan} \quad V_f = V \sin 25^\circ = 0,4226 V$$

kecepatan tangensial:

$$v = V_w + \frac{V_f}{\tan 75^\circ} = 0,9063 V + \frac{0,4226 V}{3,7321} = 1,0195 V$$

karena aliran keluar adalah radial, maka kecepatan pusar adalah nol.

$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{V_f^2}{2g}$$

$$\frac{0,9063V \times 1,0195V}{9,81} = H - \frac{V_f^2}{2g}$$

$$\frac{0,924V^2}{9,81} = H - \frac{V_f^2}{2g} = 8 - \frac{(0,4226V)^2}{2 \times 9,81}$$

$$\frac{1,013V^2}{9,81} = 8 \quad \text{atau} \quad V = \sqrt{\frac{8 \times 9,81}{1,013}} = 8,8 \text{ m/s}$$

Dengan mensubstitusikan harga V , kita peroleh kecepatan pusar pada sisi masuk:

$$V_w = 0,9063V = 0,9063 \times 8,8 = 7,98 \text{ m/s}$$

dan kecepatan tangensial pada sisi masuk:

$$v = 1,0195V = 1,0195 \times 8,8 = 8,97 \text{ m/s}$$

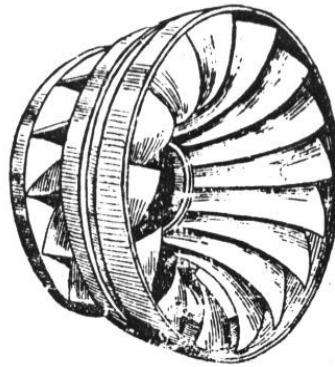
efisiensi hidrolik:

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{gH} = \frac{7,98 \times 8,97}{9,81 \times 8} = 0,912 = 91,2 \%$$

Turbin Francis

Turbin Francis adalah jenis turbin reaksi aliran ke dalam, mempunyai pembuangan radial pada sisi keluar. Ini adalah turbin yang pertama (jenis turbin reaksi aliran ke dalam) yang didesain oleh Francis. Turbin ini menghasilkan daya pada *head* medium.

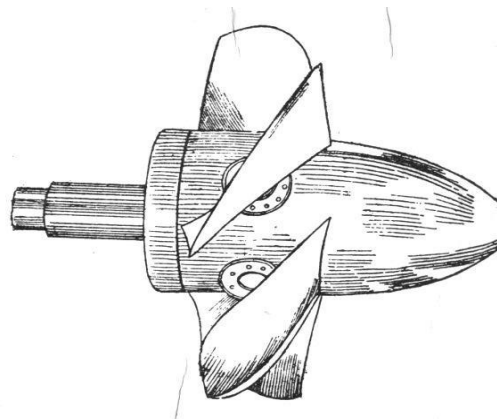
Turbin modern Francis mempunyai aliran campuran (yaitu kombinasi radial dan aksial). Turbin ini mempunyai bentuk *runner* seperti gambar 10.



Gambar 10. Runner turbin Francis.

Turbin Kaplan

Turbin Kaplan adalah turbin reaksi aliran aksial, dimana aliran air sejajar dengan poros. Turbin Kaplan digunakan untuk *head* rendah. *Runner* turbin Kaplan bisa dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Runner turbin Kaplan.

Draft Tube

Draft tube adalah penghubung turbin ke *tail race* atau kanal keluaran, dimana di dalamnya mengalir air yang keluar dari *runner* menuju ke kanal keluaran. *Draft tube* mempunyai dua fungsi penting yaitu:

1. Membuat turbin bisa ditempatkan diatas kanal keluaran, sehingga memudahkan pekerjaan inspeksi turbin.
2. Merubah energi kinetik air $\left[\frac{V_1^2}{2g} \right]$ yang keluar dari *runner* menjadi energi tekanan pada *tube*.

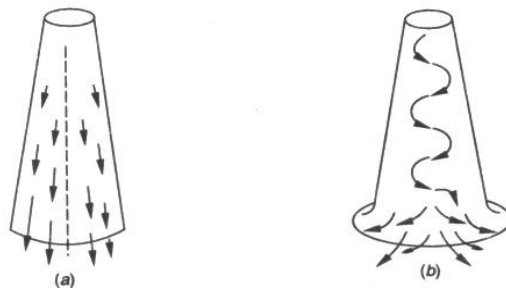
Jenis-jenis Draft Tube

Ada banyak jenis *draft tube*, namun berikut ini adalah jenis yang paling banyak dipakai:

1. *Draft tube* kerucut.
2. *Draft tube* siku.

Draft Tube Kerucut

Pada jenis kerucut, diameter tube secara bertahap meningkat dari sisi keluar *runner* menuju kanal seperti yang diperlihatkan gambar 12.

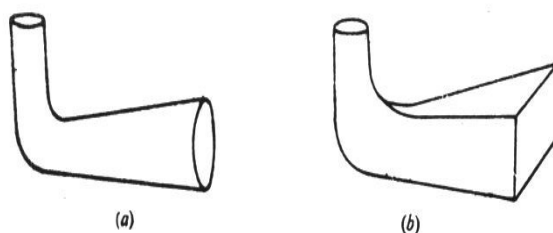


Gambar 12. Draft tube kerucut.

Draft tube kerucut banyak digunakan pada turbin Francis. Gambar 12(b) yang mempunyai bentuk keluaran seperti Lonceng sangat cocok untuk turbin dengan aliran masuk atau keluar, mempunyai aliran helikal yang disebabkan oleh kecepatan pusar pada sisi keluar *runner*. Efisiensi draft tube kerucut maksimum 90%.

Draft Tube Siku

Pada draft tube jenis siku, belokan umumnya 90° dan luas penampang tube secara bertahap meningkat mulai dari sisi keluar *runner* menuju ke kanal seperti yang ditunjukkan gambar 13.



Draft tube jenis siku umumnya digunakan pada turbin Kaplan. Efisiensi draft tube siku umumnya berkisar antara 60% hingga 70%.

Efisiensi Draft Tube

Efisiensi draft tube bisa dicari dengan persamaan berikut:

$$\eta_t = \frac{\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g}}{\frac{V_2^2}{2g}}$$

$$= \frac{V_2^2 - V_3^2}{V_2^2}$$

dimana : V_2 = kecepatan air memasuki draft tube

V_3 = kecepatan air keluar draft tube

Turbin Reaksi Lainnya

Telah banyak dilakukan penelitian untuk menemukan jenis turbin yang mempunyai unjuk kerja lebih baik. Beberapa ilmuwan dan insinyur telah menemukan turbin reaksi baru, diantaranya:

1. Turbin Fourneyron.
2. Turbin Jonval.
3. Turbin Thompson

Turbin Fourneyron

Merupakan jenis turbin reaksi aliran keluar. Turbin ini dilengkapi dengan gerbang yang bisa diatur, yang bisa dkecilkan atau dibesarkan dengan menggunakan mekanisme governor. Roda dibagi ke sejumlah kompartemen (biasanya empat) dengan diafragma horisontal sehingga ketika turbin bekerja dengan beban sebagian, hanya efisiensi kompartemen tersebut yang terpengaruh. Turbin ini bisa digunakan untuk head 1 hingga 100 m dengan efisiensi 75%.

Turbin Jonval

Merupakan jenis turbin reaksi aliran ke dalam dimana pengaturan kecepatan diperoleh dari menutup suplai air pada satu atau lebih saluran pengarah dengan menggunakan gerbang melingkar. Hal menarik dari turbin Jonval adalah membagi roda ke sejumlah kompartemen konsentrik sedemikian sehingga setiap kompartemen membentuk turbin sendiri. Turbin Jonval digunakan untuk head dari 1 hingga 50 m dan kecepatan dari 20 hingga 400 rpm.

Turbin Thompson

Adalah turbin reaksi aliran kedalam dimana roda dikelilingi oleh ruang vorteks besar. Air memasuki bagian terbesar ruang dan diarahkan ke sudu bergerak. Diameter luar roda biasanya dua kali diameter dalam. Aliran air diatur oleh suplai ke keseluruhan lingkaran luar roda. Efisiensi beban sebagian sama dengan efisiensi beban penuh.

Karakteristik Turbin

Kadang-kadang kita harus membandingkan prestasi turbin-turbin yang mempunyai output dan kecepatan yang berbeda dan bekerja dibawah *head* yang berbeda. Perbandingan akan lebih mudah jika kita menghitung output turbin jika head diturunkan menjadi satu, yaitu 1 meter. Berikut ini kita akan mempelajari tiga karakteristik turbin pada head satu satuan:

1. Daya satuan.
2. Kecepatan satuan.
3. Debit satuan.

Daya Satuan

Daya yang dihasilkan oleh turbin yang bekerja pada head 1 meter disebut sebagai *daya satuan*. Kita tahu bahwa kecepatan air dirumuskan:

$$V = \sqrt{2gH}$$

dan debit:

$$Q = aV = a\sqrt{2gH}$$

sedangkan daya yang dihasilkan turbin:

$$P = wQH = w(a\sqrt{2gH})H = \sqrt{2g} \ w a H^{3/2}$$

$$\propto H^{3/2}$$

$$= P_u H^{3/2}$$

atau $P_u = P / H^{3/2}$

dimana: P_u = daya yang dihasilkan turbin pada head satu satuan.

Kecepatan Satuan

Kecepatan turbin yang bekerja pada head 1 meter disebut sebagai *kecepatan satuan*. Kita tahu bahwa kecepatan air dirumuskan (dengan mengasumsikan C_v satu):

$$V = \sqrt{2gH}$$

dan kecepatan tangensial runner:

$$v \propto \text{kecepatan air (V)}$$

$$\propto \sqrt{H}$$

putaran runner turbin:

$$N = \frac{60v}{\pi D}$$

$$\propto v$$

$$\propto \sqrt{H}$$

$$= N_u H^{1/2}$$

atau $N_u = \frac{N}{\sqrt{H}}$

dimana: N_u = putaran turbin pada head satu satuan.

Debit Satuan

Debit turbin yang bekerja pada head 1 meter disebut sebagai *debit satuan*. Kita tahu bahwa kecepatan air dirumuskan (dengan mengasumsikan C_v satu):

$$V = \sqrt{2gH}$$

dan debit:

$$Q = aV = a\sqrt{2gH}$$

$$\propto \sqrt{H}$$

$$= Q_u \sqrt{H}$$

atau $Q_u = \frac{Q}{\sqrt{H}}$

dimana: Q_u = debit yang dihasilkan turbin pada head satu satuan.

Contoh soal

Sebuah turbin Pelton menghasilkan daya 1750 kW pada head 100 meter ketika turbin beroperasi pada 200 rpm dan mengeluarkan debit air sebesar 2500 liter/s. Carilah daya satuan, kecepatan satuan dan debit satuan dari turbin.

Jawab

Diketahui: $P = 1750$ kW; $H = 100$ m; $N = 200$ rpm; dan $Q = 2500$ lt/s = $2,5$ m³/s

Daya satuan:

$$P_u = \frac{P}{H^{3/2}} = \frac{1750}{(100)^{3/2}} = \frac{1750}{1000} = 1,75 \text{ kW}$$

Kecepatan satuan:

$$N_u = \frac{N}{\sqrt{H}} = \frac{200}{\sqrt{100}} = \frac{200}{10} = 20 \text{ rpm}$$

Debit satuan:

$$Q_u = \frac{Q}{\sqrt{H}} = \frac{2,5}{\sqrt{100}} = \frac{2,5}{10} = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pentingnya Daya Satuan, Kecepatan Satuan dan Debit Satuan

1. Pentingnya daya satuan

Jika: H = head air, dimana turbin berjalan

P = daya yang dihasilkan turbin pada head H

P_1 = daya yang dihasilkan turbin pada head H_1

dari bagian sebelumnya:

$$P \propto H^{3/2}$$

maka $P_1 \propto H_1^{3/2}$

atau $\frac{P}{P_1} = \frac{H^{3/2}}{H_1^{3/2}}$

$$P_1 = P \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{3/2}$$

2. Pentingnya kecepatan satuan

Jika: H = head air, dimana turbin berjalan

N = kecepatan yang dihasilkan turbin pada head H

N_1 = kecepatan yang dihasilkan turbin pada head H_1

dari bagian sebelumnya:

$$N \propto \sqrt{H}$$

maka $N_1 \propto \sqrt{H_1}$

atau $\frac{N}{N_1} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}} = \left(\frac{H}{H_1} \right)^{1/2}$

$$N_1 = N \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2}$$

3. Pentingnya debit satuan.

Jika: H = head air, dimana turbin berjalan

Q = debit yang dihasilkan turbin pada head H

Q_1 = debit yang dihasilkan turbin pada head H_1

dari bagian sebelumnya:

$$Q \propto \sqrt{H}$$

maka $Q_1 \propto \sqrt{H_1}$

atau $\frac{Q}{Q_1} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}} = \left(\frac{H}{H_1} \right)^{1/2}$

$$Q_1 = Q \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2}$$

Contoh soal

Sebuah turbin impuls menghasilkan daya 4500 kW pada head 200 meter. Runner turbin mempunyai kecepatan 200 rpm dan debit 0,8 meter kubik per detik. Jika head pada turbin yang sama turun menjadi 184,3 meter, carilah debit, daya dan kecepatan turbinnnya.

Jawab

Diketahui: $P = 4500$ kW; $H = 200$ m; $N = 200$ rpm; $Q = 0,8$ m³/s dan $H_1 = 184,3$ m

Debit turbin yang baru:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = 0,8 \times \left(\frac{184,3}{200} \right)^{1/2} \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 0,8 \times 0,96 = 0,768 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Daya turbin yang baru:

$$\begin{aligned} P_1 &= P \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{3/2} = 4500 \times \left(\frac{184,3}{200} \right)^{3/2} \\ &= 4500 \times 0,88 = 3960 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kecepatan turbin yang baru:

$$\begin{aligned} N_1 &= N \times \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = 200 \times \left(\frac{184,3}{200} \right)^{1/2} \\ &= 200 \times 0,96 = 192 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Kecepatan Spesifik Turbin

Kecepatan spesifik turbin didefinisikan sebagai kecepatan sebuah turbin imajiner, yang identik dengan turbin sebenarnya, namun hanya menghasilkan daya satu satuan pada head satu satuan.

Misalkan: N_s = kecepatan spesifik turbin

D = diameter runner turbin

N = kecepatan runner, rpm

v = kecepatan tengensial runner

V = kecepatan absolut air

Kecepatan tangensial turbin:

$$v \propto V$$

$$\propto \sqrt{2gH}$$

$$\propto \sqrt{H}$$

Kecepatan tangensial pada runner:

$$v = \frac{\pi D N}{60}$$

$$D \propto \frac{v}{N}$$

$$v \propto \sqrt{H}$$

$$D \propto \frac{\sqrt{H}}{N} \dots\dots\dots (i)$$

misalkan: $Q =$ debit/discharge turbin

- $b =$ lebar runner turbin
- $V_f =$ kecepatan aliran
- $D =$ diameter runner turbin
- $Q = \pi D b V_f$
- $b \propto D$

dan

$$V_f \propto \sqrt{2gH}$$

$$\propto \sqrt{H}$$

$$Q \propto \pi D \cdot D \sqrt{2gH}$$

$$\propto D^2 \sqrt{H}$$

substitusikan harga D^2 dari persamaan (i) pada persamaan di atas:

$$Q \propto \left(\frac{\sqrt{H}}{N}\right)^2 \times \sqrt{H}$$

$$\propto \frac{H^{3/2}}{N^2} \dots\dots\dots (ii)$$

misalkan P adalah daya yang dihasilkan turbin.

$$P = wQH$$

$$\propto QH$$

substitusikan harga Q dari persamaan (ii)

$$P \propto \frac{H^{3/2}}{N^2} \times H$$

$$\propto \frac{H^{5/2}}{N^2}$$

$$N^2 \propto \frac{H^{5/2}}{P}$$

$$N \propto \frac{H^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

$$N = N_s \times \frac{H^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

$$N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Pada persamaan di atas untuk kecepatan spesifik, lebih baik menggunakan P dalam kW, H dalam meter dan N dalam rpm.

Perlunya parameter kecepatan spesifik dari sebuah turbin adalah karena parameter ini tidak bergantung pada dimensi atau ukuran dari turbin aktual atau spesifik. Kita tahu bahwa pada semua turbin, yang secara geometrik adalah sama, apabila mempunyai harga head yang sama dan rasio kecepatan serta rasio aliran yang sama akan mempunyai kecepatan spesifik yang sama.

Dalam prakteknya, kecepatan spesifik paling sering digunakan. Harga kecepatan spesifik akan membantu kita dalam memperkirakan prestasi turbin.

Pemilihan turbin umumnya didasarkan atas dua faktor berikut:

1. Pemilihan berdasarkan kecepatan spesifik.
2. Pemilihan berdasarkan head air.

Berdasarkan kecepatan spesifik, pemilihan turbin bisa dilihat pada tabel berikut:

No.	Kecepatan spesifik	Jenis turbin
1.	8 – 30	Roda Pelton dengan satu nosel
2.	30 – 50	Roda Pelton dengan nosel 2 atau lebih
3.	50 – 250	Turbin Francis
4.	250 - 1000	Turbin Kaplan

Berdasarkan head air, pemilihan turbin bisa dilihat pada tabel berikut:

No.	Head air dalam meter	Jenis turbin
1.	0 – 25	Turbin Kaplan atau Francis (dianjurkan Kaplan)
2.	25 – 50	Turbin Kaplan atau Francis (dianjurkan Francis)
3.	50 – 150	Turbin Francis
4.	150 – 250	Turbin Francis atau Pelton (dianjurkan Francis)
5.	250 – 300	Turbin Francis atau Pelton (dianjurkan Pelton)
6.	di atas 300	Pelton

Contoh soal

Sebuah turbin reaksi bekerja pada head 9 meter dan debit rata-rata 11.200 ltr/s untuk menggerakkan generator dengan kecepatan 200 rpm. Berapakah kecepatan spesifik turbin? Asumsikan efisiensi keseluruhan turbin = 92%.

Jawab

Diketahui: $H = 9$ m; $Q = 11.200$ ltr/s = $11,2$ m³/s; $N = 200$ rpm; dan $\eta_o = 92\%$

$$\eta_o = \frac{P}{\rho Q H} = \frac{P}{9,81 \times 11,2 \times 9} = \frac{P}{988,8}$$

$$P = 0,92 \times 988,8 = 909,7 \text{ kW}$$

Kecepatan spesifik turbin:

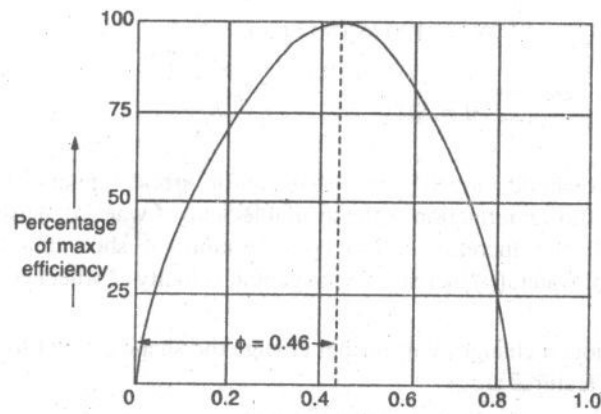
$$N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{200 \times \sqrt{909,7}}{(9)^{5/4}} = \frac{6032}{15,6} = 386,7 \text{ rpm}$$

Kurva Karakteristik Turbin Pelton

Berikut ini adalah beberapa contoh kurva karakteristik dari turbin Pelton:

1. Kurva karakteristik pada head konstan.

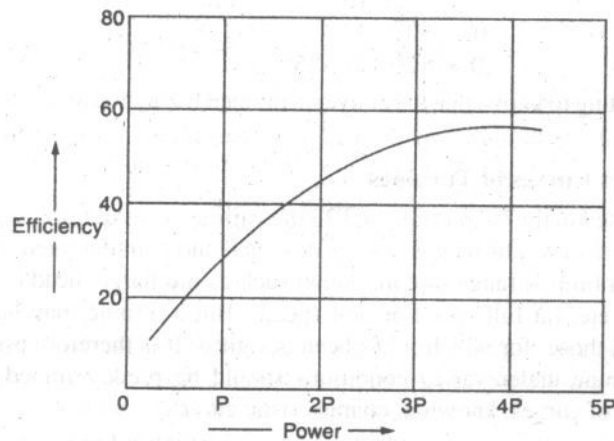
a) Rasio kecepatan vs persen efisiensi maksimum.



Gambar 14. Kuva karakteristik untuk rasio kecepatan vs persen efisiensi maksimum.

Gambar 14 menunjukkan prestasi roda Pelton pada head dan debit konstan. Kurvanya berbentuk parabola, dimana efisiensi naik dari nol dan setelah harga $\phi = 0,46$ efisiensi menurun.

b) Daya vs efisiensi

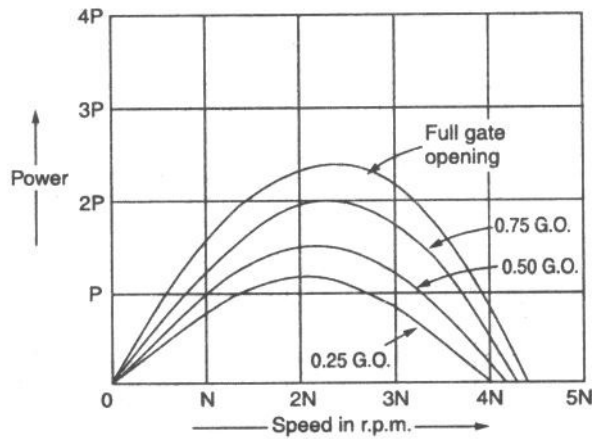


gambar 15. Kuvu karakteristik untuk daya vs efisiensi.

Gambar 15 menunjukkan prestasi turbin Pelton pada head dan kecepatan konstan. Kurva berbentuk parabola, dimana terlihat bahwa efisiensi naik dengan naiknya daya.

2. Kurva karakteristik pada berbagai bukaan katup.

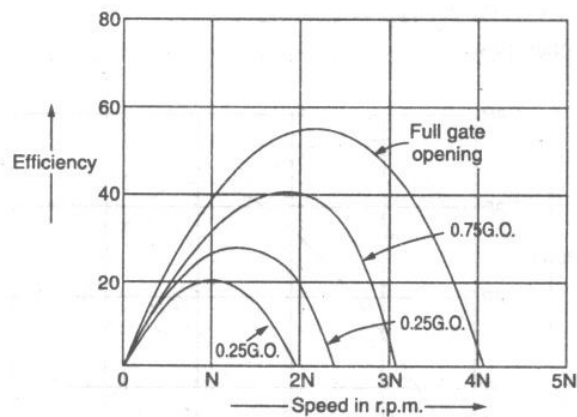
a) Kecepatan vs daya



Gambar 15. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs daya.

Gambar 15 menunjukkan prestasi roda Pelton pada head konstan. Kurva berbentuk parabola, yang menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan meningkat ketika bukaan katup meningkat.

b) Kecepatan vs efisiensi



Gambar 16. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs efisiensi.

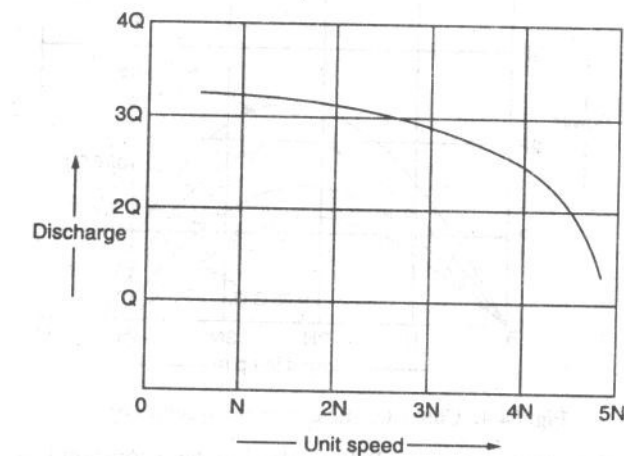
Gambar 16 menunjukkan prestasi roda Pelton pada head konstan. Kurvanya berbentuk parabola, dimana efisiensi naik dengan naiknya bukaan katup.

Kurva Karakteristik Turbin Francis

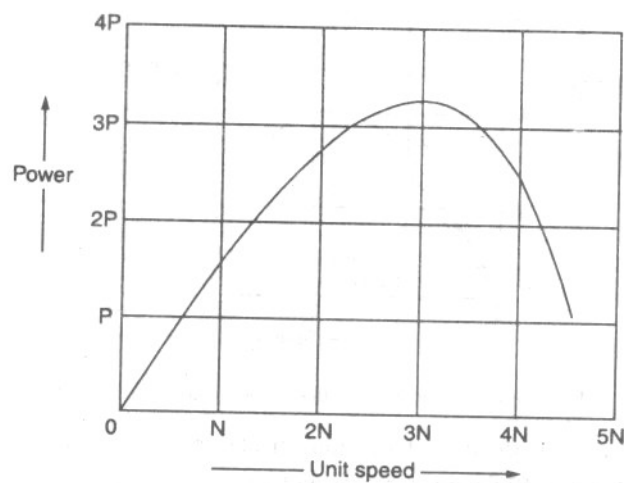
Kurva karakteristik Turbin Francis bisa dikelompokkan sebagai berikut:

1. Kurva karakteristik untuk kecepatan satuan.
2. Kurva karakteristik untuk kecepatan.
3. Kurva karakteristik untuk variasi bukaan katup.

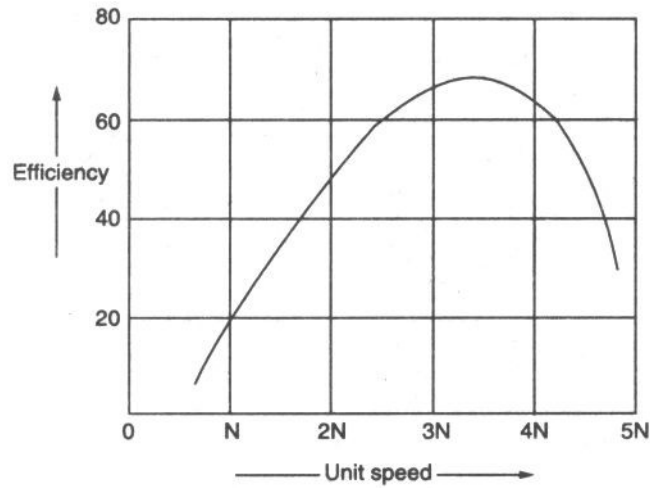
Berikut ini beberapa kurva karakteristik turbin Francis.



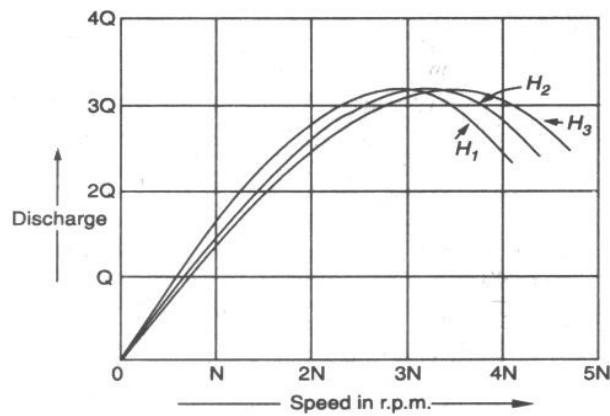
Gambar 17. Kurva karakteristik untuk kecepatan satuan vs debit/discharge.



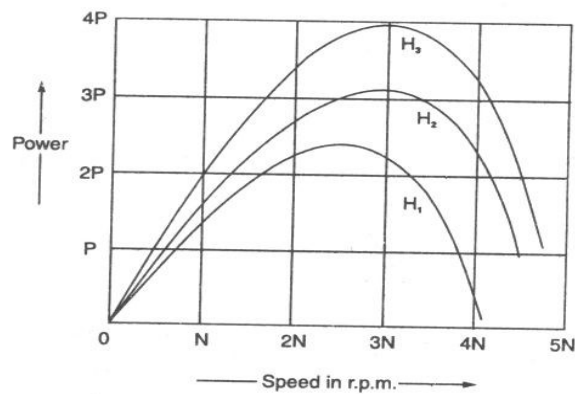
Gambar 18. Kurva karakteristik untuk kecepatan satuan vs daya



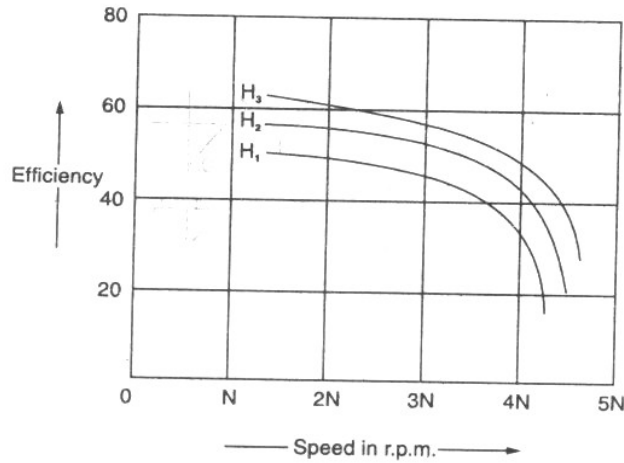
Gambar 19. Kurva karakteristik untuk kecepatan satuan vs efisiensi.



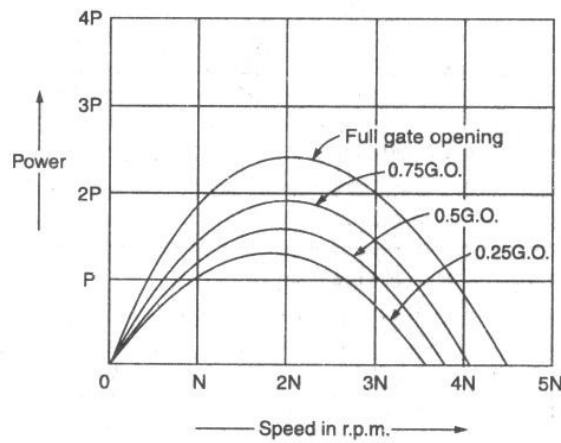
Gambar 20. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs debit pada berbagai head dan debit konstan..



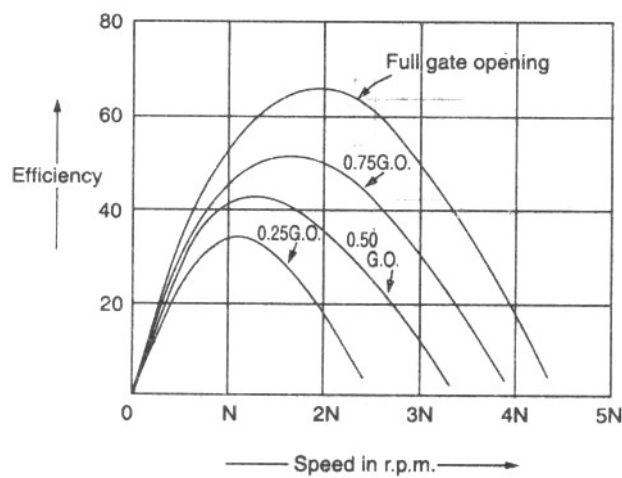
Gambar 21. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs daya pada berbagai head dan debit konstan.



Gambar 22. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs efisiensi pada berbagai head dan debit konstan.



Gambar 23. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs daya pada head konstan.



Gambar 24. Kurva karakteristik untuk kecepatan vs efisiensi pada head konstan.

Soal-soal

1. Apa yang dimaksud dengan turbin impuls.
2. Sebutkanlah perbedaan antara turbin impuls dengan turbin reaksi.
3. Turunkanlah persamaan efisiensi hidrolis roda Pelton.
4. Sebuah roda Pelton dengan diameter 1 meter bekerja dengan head 550 m. Carilah kecepatan *runner*, jika koefisien kecepatan dan rasio kecepatan masing-masingnya adalah 0,98 dan 0,47.
5. Sebuah roda Pelton, bekerja dengan head 40 meter, menghasilkan daya 100 hp, dengan kecepatan 250 rpm. Efisiensi keseluruhan adalah 80% dan koefisien kecepatan adalah 0,98, carilah diameter roda dan semburan.
6. Jelaskan perbedaan antara turbin aliran aksial dan aliran radial.
7. Sebutkan perbedaan antara turbin aliran ke dalam dan turbin aliran ke luar.
8. Sebuah turbin reaksi aliran ke dalam mempunyai diameter luar 1 meter, beroperasi dengan kecepatan 180 rpm. Sudut sudu pengarah adalah 15° . Jika kecepatan aliran pada sisi masuk adalah 3 m/s, carilah:
 - a. Kecepatan periperal pada sisi masuk.
 - b. Kecepatan pusar pada sisi masuk.
 - c. Kecepatan absolut air pada sisi masuk.
 - d. Sudut sudu pada sisi masuk.
9. Sebuah turbin Francis mempunyai diameter luar 90 cm beroperasi pada 200 rpm. Head air pada turbin adalah 9,5 m. Kecepatan aliran melalui *runner* konstan pada 3 m/s. Jika ujung sisi masuk sudu adalah radial dan lebar *runner* pada sisi masuk adalah 15 cm, carilah:
 - a. Kerja yang dilakukan per kg air.
 - b. Efisiensi hidrolis turbin.
 - c. Daya hp yang dihasilkan turbin.

BAB VII

MESIN PEMBAKARAN DALAM

Mesin pembakaran dalam adalah mesin-mesin dimana pembakaran bahan bakar terjadi di dalam silinder mesin. Mesin-mesin jenis ini contohnya adalah mesin bensin, mesin diesel dan mesin gas.

Pada mesin ini pembakaran terjadi di dalam silinder dengan loncatan api listrik dan menghasilkan temperatur yang sangat tinggi. Temperatur tinggi bisa saja merusak logam silinder, katup, dsb, karena itu perlu untuk mengeluarkan panas tersebut dari mesin. Pengeluaran panas atau pendinginan bisa saja dilakukan oleh udara lingkungannya seperti pada sepeda motor atau mesin pesawat, atau dengan sirkulasi air melalui jaket yang mengelilingi mesin.

Klasifikasi Mesin-mesin Pembakaran Dalam

Mesin pembakaran dalam bisa diklasifikasikan dengan banyak cara, tetapi pembagian-pembagian berikut cukup memberikan sudut pandang yang baik.

1. Berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan.
 - a. Mesin bensin.
 - b. Mesin gas.
 - c. Mesin diesel.
2. Berdasarkan metode pembakaran bahan bakar.
 - a. Mesin dengan loncatan api listrik (*spark ignition*)
 - b. Mesin pembakaran kompresi.
3. Berdasarkan siklus kerja.
 - a. Mesin empat langkah.
 - b. Mesin dua langkah.
4. Berdasarkan proses pembakaran.
 - a. Mesin siklus otto
 - b. Mesin siklus diesel.
 - c. Mesin siklus dual.
5. Berdasarkan kecepatan mesin.

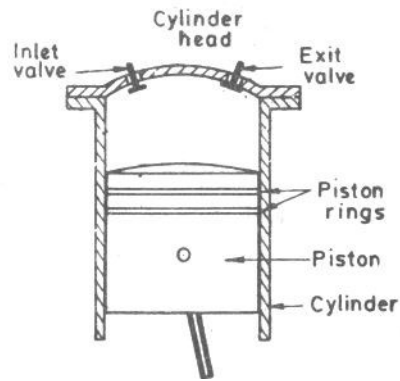
- a. Mesin kecepatan rendah.
 - b. Mesin kecepatan sedang.
 - c. Mesin kecepatan tinggi.
6. Berdasarkan sistem pendingin.
- a. Mesin berpendinginan udara.
 - b. Mesin berpendingin air.
 - c. Mesin dengan pendinginan penguapan.
7. Berdasarkan metode injeksi bahan bakar.
- a. Mesin karburator.
 - b. Mesin injeksi udara.
 - c. Mesin injeksi tanpa udara atau injeksi padat.
8. Berdasarkan pengaturan silinder.
- a. Mesin vertikal.
 - b. Mesin horisontal.
 - c. Mesin radial.

Komponen-komponen Utama

1. Silinder

Adalah salah satu komponen yang paling penting, dimana piston bergerak bolak balik untuk menghasilkan daya. Umumnya silinder mesin harus menahan tekanan tinggi (lebih dari 50×10^5 Pa) dan temperatur tinggi (lebih dari 2000 °C). Sehingga material silinder harus bisa menahan tekanan dan temperatur tinggi tersebut. Pada mesin umumnya, silinder terbuat dari besi tuang, tetapi bagi mesin beban berat, silinder dibuat dari paduan baja atau paduan aluminium. Pada mesin silinder banyak, silinder dicor dalam satu blok yang disebut blok silinder.

Kadang-kadang pelapis (liner) atau *sleeve* dimasukkan ke dalam silinder, yang bisa diganti jika telah aus. Karena material untuk pelapis relatif kecil, ia bisa dibuat dari paduan besi cor yang mempunyai umur panjang dan tahanan cukup terhadap keausan dan retak karena komponen yang bergerak bolak balik dengan cepat.



Gambar 1. Komponen-komponen utama mesin pembakaran dalam.

2. Kepala Silinder (*Cylinder Head*).

Terpasang pada salah satu ujung silinder dan berfungsi untuk menutup lobang silinder. Umumnya kepala silinder berisikan katup masuk dan buang untuk memasukkan udara segar dan membuang gas asap. Pada mesin bensin, kepala silinder juga mengandung busi untuk membakar campuran bahan bakar-udara. Tetapi pada mesin diesel, kepala silinder mempunyai nosel (katup bahan bakar) untuk menginjeksikan bahan bakar ke dalam silinder.

Kepala silinder biasanya dicor dalam satu kesatuan dan dibaut ke silinder. Biasanya kepala silinder dan silinder dibuat dari bahan yang sama. Gasket asbes atau tembaga dipasang antara silinder mesin dengan kepala silinder untuk mencegah kebocoran udara.

3. Piston

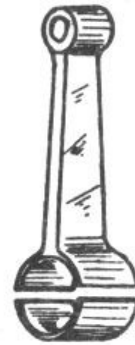
Dianggap sebagai jantungnya mesin, dimana fungsi utamanya adalah untuk mentransmisikan daya yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar ke batang penghubung (*connecting rod*). Piston biasanya dibuat dari aluminium, paduan dengan berat ringan.

4. Ring piston.

Adalah cincin/ring lingkaran dan dibuat dari paduan baja khusus yang elastik walaupun pada temperatur tinggi. Ring piston terpasang pada alur yang terdapat pada permukaan luar piston. Umumnya ada dua set ring terpasang pada piston. Fungsi ring bagian atas untuk mencegah kebocoran dari gas yang terbakar ke bagian bawahnya. Fungsi ring bagian bawah adalah untuk mencegah kebocoran antara oli ke silinder mesin.

5. Batang penghubung (Connecting rod).

Adalah penghubung antara piston dengan poros engkol, yang fungsi utamanya adalah mentransmisikan gaya dari piston ke poros engkol. Lebih jauh, batang penghubung mentransformasikan gerak bolak-balik piston ke gerak putar poros. Ujung atas batang penghubung yang lebih kecil disambungkan ke piston dan ujung bagian bawah yang lebih besar dihubungkan ke engkol.



Gambar Batang penghubung.

Batang penghubung dibuat dari paduan baja khusus atau paduan aluminium khusus.

6. Poros Engkol (*Crankshaft*).

Dianggap sebagai tulang belakangnya mesin pembakaran dalam, yang fungsinya merubah gerakan bolak balik piston ke gerak putar dengan bantuan batang penghubung. Poros ini mempunyai satu atau lebih bagian yang eksentrik yang disebut engkol. Poros engkol dibuat dari paduan baja khusus.



7. Rumah Engkol (*Crank case*).

Adalah rumah yang terbuat dari besi tuang, yang menampung silinder dan poros engkol. Ia juga berfungsi sebagai penampung minyak pelumas.

8. Roda Gaya (*Flywheel*).

Adalah roda besar, terpasang pada poros engkol, yang fungsinya adalah mengatur kecepatan supaya konstan. Hal ini dilakukan dengan menyimpan kelebihan energi selama langkah kerja, dan dikeluarkan selama langkah lainnya.

Urutan Langkah-langkah Siklus

Jika sebuah mesin bekerja secara kontinyu, kita bisa menganggap sebuah siklus dimulai dari langkah mana saja. Ketika mesin kembali ke langkah dimana kita mulai, kita katakan bahwa satu siklus telah selesai dilakukan.

Berikut ini adalah tahap-tahap sebuah siklus.

1. *Langkah hisap.*

Pada langkah ini uap bahan bakar, dengan perbandingan yang benar, disuplai ke silinder mesin.

2. *Langkah kompresi.*

Pada langkah ini, uap bahan bakar di kompresi di silinder mesin.

3. *Langkah ekspansi atau kerja.*

Pada langkah ini, uap bahan bakar dibakar, (sesaat sebelum kompresi selesai). Pada langkah ini terjadi kenaikan tekanan, karena ekspansi produk pembakaran di silinder mesin. Kenaikan tekanan ini akan menekan piston dengan gaya yang besar, dan memutar poros engkol. Pada gilirannya poros engkol akan menggerakkan mesin yang tersambung padanya.

4. *Langkah buang.*

Pada langkah ini, gas yang terbakar (atau produk pembakaran) dibuang dari silinder mesin, sehingga tersedia ruang untuk uap bahan bakar yang baru.

Catatan : Langkah-langkah yang dijelaskan di atas dimaksudkan untuk mesin bensin dan gas. Jika mesinnya mesin diesel, udara murni dihisap pada langkah hisap dan dikompresi pada langkah kompresi. Minyak diesel dimasukkan ke dalam silinder mesin (sesaat sebelum mulai langkah ekspansi) dan terbakar oleh udara panas yang ada di silinder. Langkah ekspansi dan langkah buang sama dengan yang ada pada mesin bensin/gas.

Mesin Siklus Dua Langkah dan Empat Langkah

Pada mesin dua langkah, langkah kerja diselesaikan dalam dua langkah piston atau satu putaran poros engkol. Hal ini tercapai dengan menyelesaikan proses hisap dan kompresi dalam satu langkah dan proses ekspansi dan buang pada langkah kedua. Pada mesin empat langkah, siklus kerja diselesaikan dalam empat langkah piston atau dua

putaran poros engkol. Hal ini tercapai dengan menyelesaikan langkah hisap, kompresi, ekspansi dan buang masing-masing satu langkah.

Dari sisi termodinamika, tidak ada perbedaan antara mesin dua langkah dan empat langkah. Perbedaannya adalah hanya pada sisi mekanikal.

Keuntungan dan Kerugian Mesin Dua Langkah dan Empat Langkah

Berikut ini adalah keuntungan dan kerugian mesin dua langkah terhadap mesin empat langkah:

Keuntungan

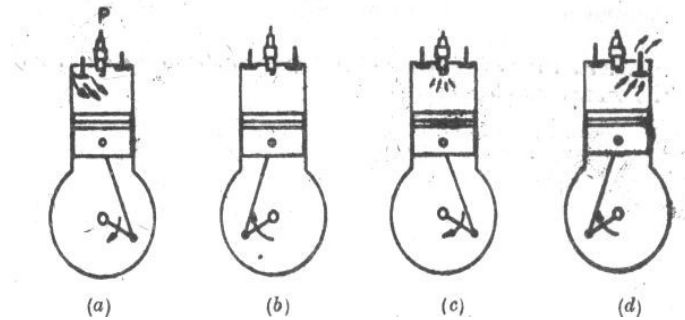
1. Mesin siklus dua langkah memberikan jumlah langkah kerja dua kali mesin empat langkah pada kecepatan yang sama. Secara teori, mesin dua langkah menghasilkan daya dua kali dari mesin empat langkah, tetapi kenyataannya mesin dua langkah menghasilkan daya 1,7 sampai 1,8 kali dari mesin empat langkah pada dimensi dan kecepatan yang sama. Hal ini disebabkan karena rasio kompresi lebih kecil dan langkah efektif lebih rendah dari langkah teoritis.
2. Untuk daya yang sama, mesin dua langkah lebih ringan, dan menempati area lantai yang lebih sedikit.
3. Karena jumlah langkah kerja pada mesin dua langkah dua kali dari mesin empat langkah, sehingga momen putar mesin dua langkah lebih merata. Karenanya mesin dua langkah mempunyai roda gaya dan pondasi yang lebih ringan. Ini juga akan mengakibatkan efisiensi mekanik yang lebih tinggi.
4. Biaya awal mesin dua langkah lebih kecil dari mesin empat langkah.
5. Mekanisme mesin dua langkah lebih sederhana dari mesin empat langkah.
6. Mesin dua langkah mudah untuk dihidupkan.

Kerugian

1. Efisiensi termal mesin dua langkah lebih rendah dari mesin empat langkah, sebab mesin dua langkah mempunyai rasio kompresi lebih rendah dari mesin empat langkah.
2. Efisiensi keseluruhan mesin dua langkah juga lebih rendah dari mesin empat langkah karena pada mesin dua langkah, saluran masuk dan buang berada pada posisi terbuka suatu ketika. Sejumlah kecil muatan terbuang dari silinder.

3. Karena jumlah langkah kerja pada mesin dua langkah dua kali mesin empat langkah, maka kapasitas sistem pendinginannya lebih besar.
4. Konsumsi minyak pelumas lebih tinggi pada mesin dua langkah karena temperatur operasinya yang lebih tinggi.
5. Gas buang pada mesin dua langkah menimbulkan suara berisik sebab waktu pembuangannya yang pendek.

Mesin Bensin Siklus Empat Langkah



Gambar 2. Mesin bensin siklus empat langkah.

Dikenal juga sebagai **siklus Otto**. Memerlukan empat langkah piston untuk menyelesaikan satu siklus operasi di silinder mesin. Mesin bensin empat langkah menghisap campuran bahan bakar dengan udara (bensin bercampur dengan udara dengan perbandingan tertentu) seperti diuraikan berikut ini.

1. Langkah hisap.

Pada langkah ini, katup masuk terbuka dan campuran udara-bahan bakar dihisap kedalam silinder ketika piston bergerak ke bawah dari titik mati atas (TMA), terus sampai piston mencapai titik mati bawah (TMB) seperti terlihat pada gambar 2 a.

2. Langkah kompresi.

Pada langkah ini, kedua katup tertutup dan campuran di kompresi ketika piston bergerak keatas dari TMB ke TMA. Akibatnya, tekanan dan temperatur campuran naik. Pada saat ini piston telah menyelesaikan satu putaran poros engkol. Langkah kompresi diperlihatkan oleh gambar 2 b.

3. Langkah ekspansi atau kerja.

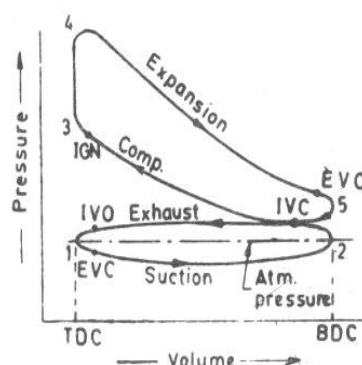
Sesaat sebelum piston mencapai TMA (selama langkah kompresi) campuran dibakar dengan bantuan busi (spark plug). Hal ini akan menyebabkan kenaikan tekanan dan temperatur produk pembakaran tetapi volume relatif tetap. Karena kenaikan tekanan, piston didorong kebawah dengan gaya yang besar. Gas

pembakaran panas berekspansi karena kecepatan tinggi piston. Selama ekspansi, sebagian energi panas yang dihasilkan dirubah ke kerja mekanik. Perlu dicatat bahwa selama langkah kerja, kedua katup tertutup dan piston bergerak dari TMA ke TMB.

4. Langkah buang.

Pada langkah ini, katup buang terbuka ketika piston bergerak dari TMB ke TMA. Pergerakan piston ini akan mendorong produk pembakaran dari silinder mesin dan dibuang melalui katup buang ke atmosfer. Saat ini siklus selesai dan silinder mesin siap untuk menghisap campuran udara-bahan bakar kembali.

Gambar 3 memperlihatkan diagram indikator mesin bensin empat langkah. Langkah hisap ditunjukkan oleh garis 1-2, yang terletak dibawah garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini maka campuran bahan bakar-udara mengalir ke dalam silinder mesin. Langkah kompresi ditunjukkan oleh garis 2-3 yang memperlihatkan katup masuk tertutup (IVC) sedikit setelah titik 2 (TMB/BDC).



Gambar 3. Diagram indikator untuk mesin bensin empat langkah.

Pada akhir langkah, terjadi kenaikan tekanan di dalam silinder. Sedikit sebelum akhir langkah kompresi (TMA/TDC), campuran dibakar dengan bantuan busi (IGN) seperti ditunjukkan oleh gambar. Loncatan api listrik dari busi menghasilkan pembakaran yang menaikkan tekanan dan temperatur produk pembakaran, tetapi volume konstan, seperti ditunjukkan oleh garis 3-4. Langkah ekspansi ditunjukkan oleh garis 4-5 dimana katup buang terbuka (EVO) sedikit sebelum titik 5 (TMB). Sekarang gas asap dibuang ke atmosfer pada garis 5-1 yang terletak diatas garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini menyebabkan gas buang mengalir ke luar silinder mesin.

Mesin Diesel Siklus Empat Langkah

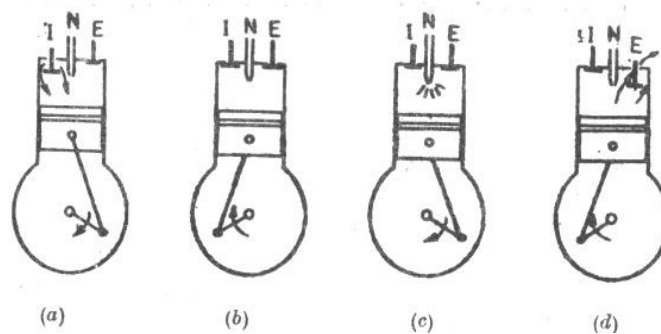
Mesin siklus diesel empat langkah mempunyai langkah-langkah sebagai berikut:

1. Langkah hisap atau pemuatan.

Pada langkah ini, katup masuk (I) terbuka dan udara murni disedot ke dalam silinder ketika piston bergerak turun dari TMA ke TMB seperti yang diperlihatkan gambar 4a.

2. Langkah Kompresi.

Pada langkah ini, kedua katup tertutup dan udara dikompresi ketika piston bergerak keatas dari TMB ke TMA. Dari hasil kompresi, tekanan dan temperatur udara meningkat. Sampai saat ini poros telah berputar satu putaran.



Gambar 4. Mesin diesel siklus empat langkah.

3. Langkah ekspansi atau kerja.

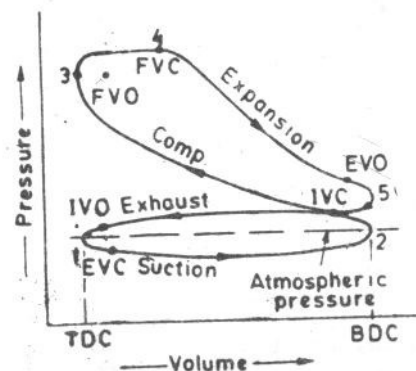
Sesaat sebelum piston mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan dalam bentuk semburan sangat halus ke dalam silinder mesin melalui nosel (N) yang disebut juga katup injeksi bahan bakar. Pada kondisi ini temperatur udara yang ada disilinder sudah bisa membakar bahan bakar. Hasilnya terjadi kenaikan tiba-tiba tekanan dan temperatur dari produk pembakaran. Bahan bakar diasumsikan terbakar pada tekanan konstan. Karena terjadi kenaikan tekanan, piston di dorong kebawah dengan gaya yang besar. Gas panas tersebut berekspansi karena gerakan turun piston, selama ekspansi ini energi panas dirobah menjadi energi mekanik kerja.

4. Langkah buang.

Pada langkah ini, katup buang (E) terbuka ketika piston bergerak ke atas. Pergerakan piston ini mendorong keluar produk pembakaran dari dalam silinder melalui katup buang ke atmosfer. Langkah ini menyelesaikan siklus dan silinder mesin siap untuk menghisap udara segar kembali.

Gambar 5 memperlihatkan diagram indikator mesin diesel siklus empat langkah. Langkah hisap ditunjukkan oleh garis 1-2, yang terletak dibawah garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini maka udara mengalir ke dalam silinder mesin. Langkah

kompresi ditunjukkan oleh garis 2-3 yang memperlihatkan katup masuk tertutup (IVC) sedikit setelah titik 2 (TMB/BDC). Pada akhir langkah, terjadi kenaikan tekanan di dalam silinder. Sedikit sebelum akhir langkah kompresi (TMA/TDC), katup bahan bakar terbuka dan bahan bakar diinjeksikan ke silinder mesin. Bahan bakar dibakar oleh temperatur tinggi udara bertekanan. Pembakaran menaikkan tekanan dan temperatur produk pembakaran, tetapi tekanan konstan, seperti ditunjukkan oleh garis 3-4. Langkah ekspansi ditunjukkan oleh garis 4-5 dimana katup buang terbuka (EVO) sedikit sebelum titik 5 (TMB). Sekarang gas asap dibuang ke atmosfer pada garis 5-1 yang terletak diatas garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini menyebabkan gas buang mengalir ke luar silinder mesin.



Gambar 5. Diagram indikator untuk mesin diesel siklus empat langkah.

Perbandingan Mesin Bensin dengan Mesin Diesel

Berikut perbedaan antara mesin diesel dan mesin bensin.

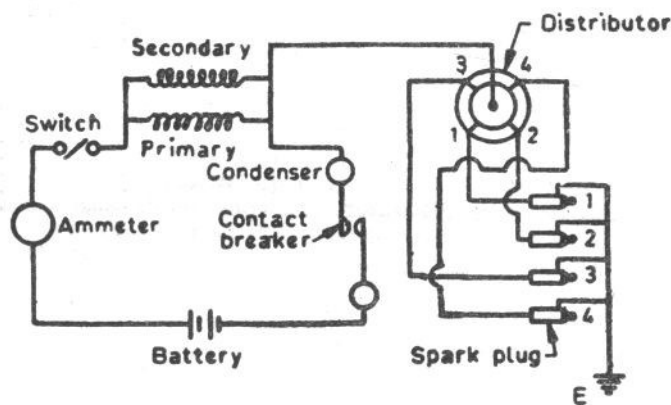
	Mesin Bensin	Mesin Diesel
1	Mesin bensin menarik campuran bensin dan udara selama langkah hisap.	Mesin diesel hanya menarik udara selama langkah hisap
2	Tekanan pada akhir kompresi sekitar 10 kg/cm ² .	Tekanan pada langkah kompresi sekitar 35 kg/cm ² .
3	Campuran bahan bakar udara dibakar dengan bantuan busi.	Bahan bakar diinjeksi dalam bentuk spray.
4	Pembakaran bahan bakar terjadi pada hampir volume konstan.	Pembakaran terjadi pada hampir tekanan konstan.
5	Mempunyai rasio kompresi sekitar 6 - 10.	Mempunyai rasio kompresi sekitar 15 - 25.
6	Karena rasio kompresi rendah, mesin bensin lebih ringan dan murah.	Karena rasio kompresi tinggi maka mesin diesel lebih berat dan mahal.
7	Biaya pemakaian mesin bensin tinggi karena biaya bensin yang lebih tinggi.	Biaya pemakaian mesin diesel rendah karena biaya diesel yang rendah.?

--	--	--

Sistem Pengapian Mesin Bensin

Pada mesin bensin, digunakan busi untuk memulai pembakaran. Tegangan listrik yang diperlukan untuk mendapatkan loncatan listrik pada busi kira-kira 8000 Volt. Kemudian sistem penyalan pada setiap silinder harus diatur pada waktu yang tepat. Berikut ini adalah sistem penyalan yang penting pada mesin bensin:

1. Sistem penyalan koil.
2. Sistem penyalan magnet.
3. Sistem penyalan CDI.



1. Sistem penyalan koil.

Gambar 6. Sistem penyalan koil.

Disebut juga sistem penyalan baterai, mempunyai koil induksi yang terdiri dari dua gulungan yaitu gulungan primer dan sekunder seperti diperlihatkan gambar 18. Gulungan primer terdiri dari ratusan gulungan kawat. Di atas koil ini digulung ribuan gulungan kawat sebagai gulungan sekunder. Salah satu ujung koil dihubungkan dengan baterai. Gulungan sekunder dihubungkan dengan *distributor* (untuk mesin banyak silinder) dan selanjutnya dihubungkan ke elektroda busi. Kondenser dipasang di kedua ujung *breaker* (atau platina) dengan tujuan:

1. Mencegah loncatan api pada kontak platina.
2. Memberikan pemutusan yang lebih cepat pada arus primer, dan memberikan tegangan yang lebih tinggi pada gulungan sekunder.

Ketika arus melalui gulungan primer, akan timbul medan magnetik yang menutupi gulungan primer dan sekunder. Ketika switch *on*, *breaker* menghubungkan kedua

ujungnya. Medan magnetik akan cenderung naik dari nol ke maksimum. Karena kenaikan medan magnetik, tegangan dibangkitkan di kedua gulungan, tetapi dengan arah yang berlawanan dengan tegangan dari baterai. Karenanya gulungan primer belum memberikan harga final. Tegangan pada gulungan sekunder karenanya belum cukup untuk mengatasi hambatan udara pada celah busi, sehingga tidak terjadi loncatan api.

Ketika arus pada gulungan primer diputus, medan magnetik yang timbul disekitar koil hilang seketika. Variasi fluks yang tiba-tiba memberikan kenaikan tegangan pada setiap gulungan. Karena jumlah gulungan pada bagian sekunder sangat banyak, sehingga tegangan yang timbul juga tinggi, yaitu di sekitar 6000 hingga 10000 volt. Tegangan ini cukup untuk memberikan loncatan api pada busi.

2. Sistem penyalaaan magnet.

Sistem penyalaaan magnet mempunyai prinsip kerja yang sama dengan sistem penyalaaan koil, kecuali tidak diperlukan baterai, karena magnet berlaku sebagai *generator* tegangan. Arus yang dihasilkan magnet mengalir ke koil induksi yang cara kerjanya sama dengan sistem penyalaaan koil. Arus tegangan tinggi kemudian dialirkan ke distributor, yang disambungkan ke busi.

3. Sistem penyalaaan Elektronik

Perbedaan dengan sistem penyalaaan platina adalah pada sirkuit primernya. Pada sistem koil/platina, kontak pemutus membuka dan menutup sirkuit primer, sedangkan pada sistem elektronik, *Electronic Control Unit* (ECU) yang membuka dan menutup sirkuit primer. Untuk sirkuit sekunder hanya mempunyai sedikit perbedaan terutama tegangan yang dihasilkan sistem penyalaaan elektronik mencapai 47000 V.

Sistem Pendinginan

Karena pembakaran bahan bakar terjadi di dalam mesin pada mesin pembakaran dalam, maka selalu dibangkitkan panas. Didapati bahwa sekitar 30% dari panas yang dibangkitkan yang dirubah ke kerja mekanik. 40% dibawa oleh gas buang ke atmosfer dan sisanya sekitar 30% terserap ke silinder mesin, piston, kepala silinder, katup mesin dll. Juga ditemukan bahwa pemanasan yang berlebihan pada komponen-komponen ini akan menyebabkan efek-efek berikut ini:

1. Pemanasan berlebihan (*overheating*) akan menyebabkan tegangan termal pada komponen mesin, yang akan membuatnya cacat.

2. Pemanasan berlebihan akan menurunkan kekuatan piston. Pemanasan berlebihan bahkan bisa menyebabkan piston pecah.
3. Pemanasan berlebihan bisa menyebabkan penguraian minyak pelumas, yang bisa menyebabkan penumpukan karbon pada mesin dan kepala piston.
4. Pemanasan berlebihan bisa menyebabkan katup dan dudukan katup terbakar.
5. Pemanasan berlebihan bisa mengurangi efisiensi volumetrik mesin.
6. Pemanasan berlebihan bisa meningkatkan tendensi detonasi.

Untuk mencegah efek yang merugikan karena pemanasan berlebihan, penting untuk memberikan sistem pendinginan pada mesin. Secara umum, sistem pendinginan yang diberikan harus mempunyai dua karakteristik supaya kerja mesin efisien:

1. Harus bisa membuang sekitar 30% dari total panas yang dihasilkan di ruang bakar. Dari pengalaman, bahwa pembuangan panas lebih dari 30% akan menurunkan efisiensi termal mesin, dan pembuangan panas kurang dari 30% akan memberikan efek yang merugikan seperti yang disebutkan di atas.
2. Harus bisa membuang panas dengan laju cepat, ketika mesin panas. Tetapi ketika mesin baru dihidupkan, pendinginan harus pelan, sehingga berbagai komponen mesin mendapatkan temperatur kerja pada waktu yang pendek.

Ada dua jenis sistem pendinginan yang banyak digunakan saat ini:

1. *Sistem pendinginan udara.*

Sistem pendinginan udara digunakan pada mesin sepeda motor, sekuter, pesawat terbang dan instalasi stasioner lainnya. Pada negara-negara yang beriklim dingin, sistem ini juga digunakan pada mobil. Pada sistem ini, panas dibuang langsung ke atmosfer dengan cara konduksi melalui dinding silinder. Untuk meningkatkan laju pendinginan, daerah permukaan luar silinder dan kepala silinder ditingkatkan dengan membuat sirip dan flensa radiasi. Pada unit yang lebih besar, kipas angin dipasang untuk mensirkulasikan udara disekeliling dinding silinder dan kepala silinder.

2. *Sistem pendinginan air.*

Sistem pendinginan air digunakan pada mesin mobil, bus, truk dsb. Pada sistem ini, air disirkulasikan melalui jaket air disekeliling masing-masing ruang bakar, silinder, dudukan katup dan tangkai katup. Air dijaga terus bergerak dengan menggunakan pompa sentrifugal yang digerakkan dengan tali kipas dari puli pada poros engkol.

Setelah melewati jaket didalam blok dan kepala silinder, air masuk ke radiator. Didalam radiator, air didinginkan dengan udara yang ditarik oleh kipas. Setelah melalui radiator, air keluar dan masuk ke pompa air. Air kembali disirkulasikan ke jaket mesin.

Perbandingan Antara Sistem Pendinginan Udara dengan Sistem Pendinginan Air

Berikut ini adalah hal-hal penting mengenai perbandingan antara sistem pendinginan udara dan pendinginan air.

No.	Sistem pendinginan udara	Sistem pendinginan air
1.	Desain sistem sederhana dan biaya rendah.	Desain sistem ini rumit dan biaya lebih tinggi.
2.	Berat sistem pendinginan (per hp mesin) lebih kecil.	Berat sistem pendinginan (per daya kuda mesin) lebih berat.
3.	Konsumsi bahan bakar (per hp mesin) lebih besar.	Konsumsi bahan bakar (per hp mesin) lebih sedikit.
4.	Instalasi dan perawatan mudah dan biayanya rendah.	Instalasinya dan perawatan sulit dan biaya lebih tinggi.
5.	Tidak ada bahaya kebocoran dan pembekuan cairan pendingin.	Ada bahaya kebocoran atau pembekuan cairan pendingin.
6.	Pendinginan bekerja dengan lancar dan kontinyu. Tidak bergantung pada cairan pendingin.	Jika sistem gagal, bisa menimbulkan kerusakan yang serius pada mesin dalam waktu yang singkat.

Pelumasan Mesin

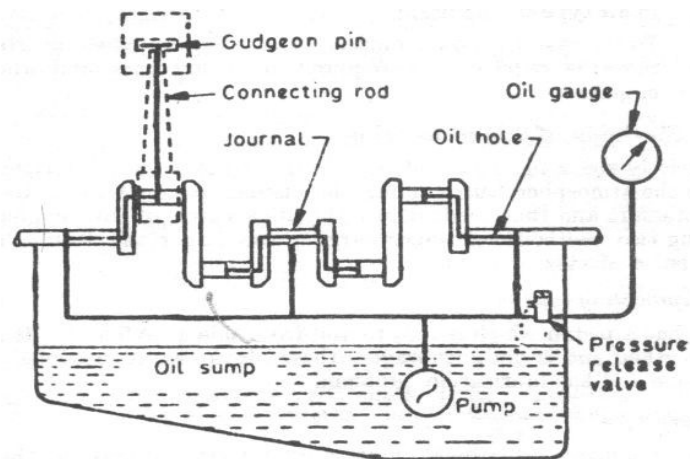
Komponen yang bergerak pada mesin akan mengalami aus karena gesekan satu sama lainnya. Untuk mencegah keausan dini, pelumasan yang sesuai diperlukan. Pada umumnya, berikut ini adalah keuntungan-keuntungan utama pelumasan mesin pembakaran dalam.

1. Mengurangi keausan komponen-komponen yang bergerak.
2. Meredam getaran mesin.
3. Mengambil panas yang diakibatkan oleh gesekan komponen-komponen.
4. Membersihkan komponen-komponen yang bergerak.
5. Memberikan kekedapan pada piston.

Berikut ini adalah dua jenis sistem pelumasan yang penting pada mesin pembakaran dalam.

1. *Splash lubrication. (pelumasan percikan).*

Cara ini biasanya digunakan untuk pelumasan mesin ukuran kecil. Pada metode ini, minyak pelumas ditampung di dasar poros engkol dan pompa dicelupkan ke dalam minyak seperti yang ditunjukkan gambar 7. Lubang kecil dibuat di dalam poros engkol dan minyak dialirkan pada lobang ini ke bantalan. Minyak juga dialirkan ke tangkai penghubung melalui lobang di dalam tangkai atau dengan pipa tembaga pendek ke pena gudgeon dan piston.

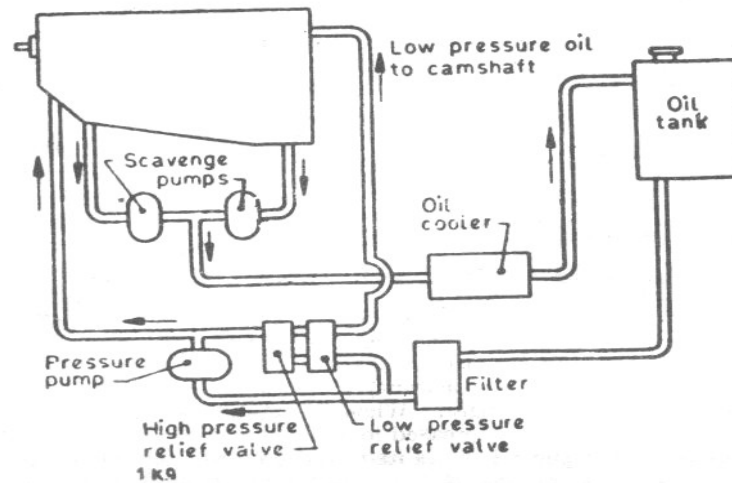


Gambar 7. Pelumasan Splash.

Kelebihan minyak dibuang dalam bentuk sprai/semburan dari bantalan karena gaya sentrifugal. Kelebihan minyak akan melumasi nok, tangkai katup dsb. Keseluruhan minyak dibuang kembali ke bak penampung.

2. *Pelumasan paksa.*

Pada metode ini, minyak pelumas ditampung pada tangki terpisah dan dipompa dengan tekanan tinggi ke bantalan utama. Minyak akan melewati poros nok/camshaft dan roda gigi timing (*timing gear*) pada tekanan yang lebih rendah. Minyak pelumas dipompa kembali ke tangki melalui pendingin minyak dengan pompa scavenge.



Gambar 8.

Unjuk Kerja Mesin Pembakaran Dalam

A. Daya Indikated

Daya kuda indikated (IHP : Indicated Horse Power) adalah daya yang dihasilkan oleh silinder mesin.

$$IHP = \frac{Tp_m LAN}{4500} \text{ hp atau}$$

dalam SI:
$$IHP = \frac{100.T.p_m.LAN}{60} \text{ kW}$$

dimana : p_m = tekanan efektif rata-rata aktual, kg/cm^2 (SI: bar)

L = panjang langkah, m

A = luas penampang piston, cm^2 (SI: m^2)

n = kecepatan mesin, rpm

$N = n$: untuk siklus dua langkah

$N = n/2$: untuk siklus empat langkah

T = jumlah silinder

Contoh soal

Sebuah mesin bensin satu silinder dua langkah menghasilkan daya indikated sebesar 5,0 hp. Carilah kecepatan piston rata-rata, jika tekanan efektif rata-rata adalah $6,5 \text{ kg/cm}^2$ dan diameter piston 100 mm.

Jawab

Diketahui: $IHP = 5,0 \text{ hp}$

$$p_m = 6,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{diameter piston} = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

Luas penampang piston:

$$A = \frac{\pi}{4} \times 10^2 = 25\pi \text{ cm}^2$$

$$\text{Kecepatan rata-rata mesin} = 2LN$$

Jumlah langkah kerja permenit:

$$= N \text{ (karena mesin bekerja pada siklus dua langkah)}$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$IHP = \frac{p_m \cdot LAN}{4500}$$

$$5 = \frac{6,5 \times 25\pi (2LN)}{2 \times 4500} = 0,0567(2LN)$$

$$2LN = 88,2 \text{ m/s}$$

Daya Kuda Brake (daya rem)

Daya kuda brake (*brake horse power*) adalah daya yang tersedia pada poros engkol.

A Proney Brake

Dirumuskan :

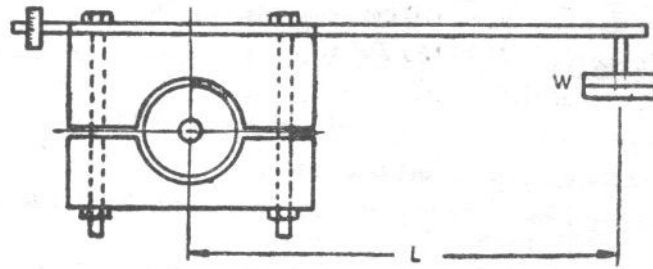
$$BHP = \frac{Wl 2\pi N}{4500} \text{ hp atau}$$

$$SI: \quad BHP = Wl2\pi N \text{ watt}$$

dimana : W = beban brake/rem, kg

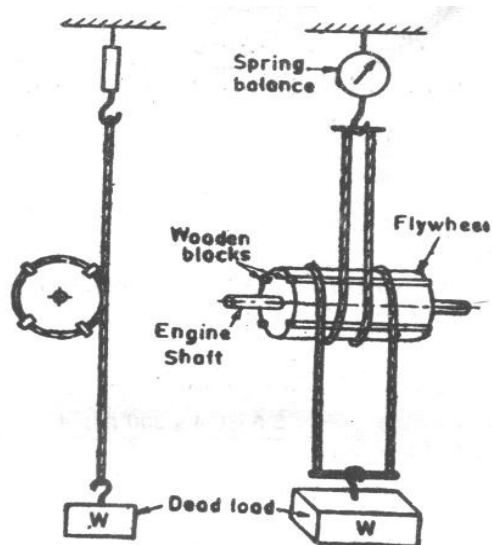
l = panjang lengan, m

N = kecepatan mesin, rpm



Gambar 10. Rem Proney.

B. Rope Brake



Gambar 11. dinamometer rope brake.

Dirumuskan :

$$BHP = \frac{(W - S) \pi DN}{4500} \text{ hp}$$

$$BHP = \frac{(W - S) \pi (D + d) N}{4500} \text{ hp (dengan memperhitungkan diameter tali)}$$

$$BHP = (W - S) \pi DN \text{ watt}$$

dimana : W = beban , kg

S = pembacaan pegas, kg

D = diameter drum brake, m

d = diameter tali, m

N = rpm mesin

Contoh soal

Data-data berikut diambil selama pengujian mesin.

Kecepatan mesin 1000 rpm; beban brake/rem 100 kg; dan panjang lengan rem 75 cm.

Carilah: (i) Torsi rem; (ii) BHP mesin.

Jawab

Diketahui: $N = 1000$ rpm

beban rem, $W = 100$ kg

$l = 75$ cm = 0,75 m

(i) Torsi Rem:

Torsi rem = $Wl = 100 \times 0,75 = 75$ kg-m

(ii) BHP mesin:

Dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} BHP &= \frac{Wl \times 2\pi N}{4500} \\ &= \frac{100 \times 0,75 \times 2\pi \times 1000}{4500} \\ &= 104,7 \text{ hp} \end{aligned}$$

B. Efisiensi mesin pembakaran dalam

1. *Efisiensi Mekanik:*

Adalah rasio daya kuda brake terhadap daya kuda indikated :

$$\eta_m = \frac{BHP}{IHP}$$

2. *Efisiensi keseluruhan :*

Adalah rasio kerja yang didapatkan pada poros engkol terhadap energi yang diberikan pada waktu yang sama.

$$\eta_o = \frac{BHP \times 4500}{\text{kalor yang diberikan} \times J}$$

dimana : $J =$ ekivalen kalor mekanik.

3. *Efisiensi termal indikated :*

Adalah rasio kalor ekivalen satu hp terhadap kalor bahan bakar per IHP jam.

$$\eta_t = \frac{632,3 \times IHP}{W \times C}$$

$$\eta_t = \frac{3600 \times IHP}{W \times C} \quad (\text{dalam SI})$$

dimana : W = berat bahan bakar yang dikonsumsi per jam

C = nilai kalor bahan bakar

4. Efisiensi termal brake :

Adalah rasio kalor ekivalen 1 hp terhadap kalor bahan bakar per BHP jam.

$$\eta_b = \frac{632,3 \times BHP}{W \times C}$$

$$\eta_b = \frac{3600 \times BHP}{W \times C} \quad (\text{dalam SI})$$

5. Efisiensi Volumetrik :

Adalah : rasio volume aktual udara yang dihisap selama langkah hisap pada kondisi NTP (Normal Temperature and Pressure : yaitu temperatur 0 °C dan tekanan $1,03 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$) terhadap volume langkah piston.

$$\eta_v = \frac{V_a}{V_s}$$

Contoh soal

Sebuah mesin gas 2 langkah mempunyai piston dengan diameter 150 mm, panjang langkah 400 mm dan tekanan efektif rata-rata 5,5 bar. Mesin menghasilkan 120 ledakan per menit. Carilah efisiensi mekanik mesin jika *BHP*-nya 5 kW.

Jawab

Diketahui: $D = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$

$$A = \frac{\pi}{4} \times (0,15)^2 = 0,0177 \text{ m}^2$$

$L = 400 \text{ mm} = 0,4 \text{ m}$

$$p_m = 5,5 \text{ bar}$$

Ledakan per menit, $N = 120$

$$BHP = 5 \text{ kW}$$

$$IHP = \frac{100 p_m L A N}{60}$$

$$= \frac{100 \times 5,5 \times 0,4 \times 0,0177 \times 120}{60} = 7,79 \text{ kW}$$

Efisiensi mekanik:

$$\eta_m = \frac{BHP}{IHP} = \frac{5}{7,79} = 0,642 = 64,2 \%$$

Contoh soal

Diameter dan panjang langkah suatu mesin gas dua langkah satu silinder yang bekerja pada siklus volume konstan masing-masing adalah 200 mm dan 300 mm dengan volume clearance 2,75 liter. Ketika mesin berjalan pada 135 rpm, tekanan efektif rata-rata indikated adalah 5,2 bar dan konsumsi gas 8,8 m³/jam. Jika nilai kalor gas yang digunakan adalah 16.350 kJ/m³, carilah: (i) efisiensi standar udara; (ii) daya indikated yang dihasilkan mesin; (iii) efisiensi termal indikated mesin.

Jawab

Diketahui: diameter silinder = 200 mm = 0,2 m

$$\text{Luas penampang: } A = \frac{\pi}{4} \times (0,2)^2 = 0,0314 \text{ m}^2$$

$$L = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Volume langkah} = A \times L = 0,0314 \times 0,3 = 0,00942 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume clearance} = 2,78 \text{ liter} = 0,00278 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume total silinder} = 0,00942 + 0,00278 = 0,0122 \text{ m}^3$$

$$\text{rasio kompresi, } r = \frac{0,0122}{0,00278} = 4,4$$

kecepatan mesin = 135 rpm

maka jumlah langkah kerja per menit:

$$N = 135 \text{ rpm (mesin bekerja pada siklus dua langkah)}$$

$$p_m = 5,2 \text{ bar}$$

konsumsi gas, $W = 8,8 \text{ m}^3/\text{jam}$

Nilai kalor gas, $C = 16.350 \text{ kJ/m}^3$,

(i) efisiensi standar udara

$$\begin{aligned}\eta_{ase} &= 1 - \frac{1}{r^{y-1}} = 1 - \frac{1}{(4,4)^{1,4-1}} = 1 - \frac{1}{(4,4)^{0,4}} \\ &= 0,448 = 44,8 \%\end{aligned}$$

(ii) daya indikated yang dihasilkan mesin

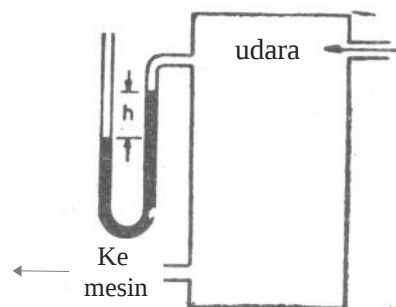
$$\begin{aligned}IHP &= \frac{100 \times p_m \times L A N}{60} \\ &= \frac{100 \times 5,2 \times 0,3 \times 0,0314 \times 135}{60} \\ &= 11,0 \text{ kW}\end{aligned}$$

(iii) efisiensi termal indikated mesin

$$\begin{aligned}\eta_i &= \frac{3600 \times IHP}{W \times C} \\ &= \frac{3600 \times 11,0}{8,8 \times 16350} = 0,275 = 27,5 \%\end{aligned}$$

Konsumsi Udara

Suplai udara ke mesin pembakaran dalam bisa diukur secara eksperimen dengan cara melewatkan udara melalui *orifice* ke tangki besar (volume tangki 500 kali lebih besar dari volume langkah mesin). Udara kemudian dialirkan ke mesin.



Gambar 12. Konsumsi udara.

Jika: a = luas orifice, m^2

C_d = koefisien hantar orifice

H = head yang menyebabkan aliran udara melalui orifice, meter udara

m = berat udara per m^2 pada kondisi atmosfer

w = berat air = 1000 kg/m^3

$$= 1 \text{ gr/cm}^3$$

h = perbedaan tekanan pada tabung U, dalam cm air

Head yang menyebabkan air mengalir melalui orifice:

$$H = \frac{h}{100} \times \frac{w}{m} \quad \text{meter udara}$$

Kecepatan udara:

$$V = \sqrt{2gH} \quad \text{m/s}$$

Jumlah udara yang melalui orifice:

$$Q = C_d \cdot a \cdot V = C_d \cdot a \sqrt{2gH} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Dengan menganggap volume udara atmosfer pada p kg/cm² dan temperatur atmosfer T °K, menggunakan persamaan karakteristik gas:

$$pv = mRT$$

$$m = \frac{pv}{RT} = \frac{p}{RT} \quad \text{kg/m}^3$$

Berat udara yang disuplai:

$$W = Q \times m = C_d \cdot a \sqrt{2gh} \times \frac{p}{RT} \quad \text{kg}$$

Contoh soal

Data berikut diambil selama pengujian mesin pembakaran dalam 4 langkah satu silinder:

kecepatan mesin : 300 rpm

diameter orifice pada angki udara: 20 mm

tekanan yang menyebabkan aliran udara melalui orifice: 100 mm air

Carilah jumlah udara yang dikonsumsi per detik, jika berat udara pada kondisi atmosfer 1,15 kg/m³. Ambil koefisien hantar orifice 0,7.

Jawab

Diketahui: kecepatan mesin = 300 rpm

diameter orifice = 20 mm = 2 cm

luas penampang orifice:

$$a = \frac{\pi}{4} \times 2^2 = 3,142 \quad \text{cm}^2 = 3,142 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

tekanan yang menyebabkan udara mengalir:

$$h = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm air}$$

berat udara pada kondisi atmosfer: $m = 1,15 \text{ kg/m}^3$

Koefisien hantar orifice: $C_d = 0,7$

Head yang menyebabkan aliran udara:

$$H = \frac{h}{100} \times \frac{w}{m} = \frac{10}{100} \times \frac{1000}{1,15}$$

$$= 86,96 \text{ m udara}$$

Kecepatan aliran udara:

$$V = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 86,96}$$

$$= 41,3 \text{ m/s}$$

Jumlah udara yang mengalir:

$$Q = C_d \cdot a \cdot V = 0,7 \times (3,142 \times 10^{-4}) \times 41,3$$

$$= 0,091 \text{ m}^3/\text{s}$$

Lembar Kesetimbangan Kalor

Catatan lengkap dari kalor yang disuplai atau dibuang selama waktu tertentu (misalkan satu menit) dari mesin pembakaran dalam di masukkan kedalam sebuah tabel yang disebut *lembar kesetimbangan kalor*. Harga-harga berikut diperlukan untuk melengkapi lembar kesetimbangan kalor dari sebuah mesin pembakaran dalam:

1. Kalor yang diberikan oleh bahan bakar

Misalkan W = berat bahan bakar yang disuplai, kg.min

C = nilai kalor rendah dari bahan bakar, kcal/kg

Kalor yang diberikan oleh bahan bakar:

$$= W \times C \text{ kcal/min}$$

2. Kalor yang diserap untuk menghasilkan IHP

$$IHP = \frac{P_m \cdot LAN}{4500} \text{ hp}$$

Kalor yang diserap oleh IHP:

$$= \frac{IHP \times 4500}{J} \text{ kcal/min}$$

J = ekivalen mekanik untuk kalor.

3. Kalor yang dilepaskan ke air pendinginan

Berat air pendingin yang bersirkulasi pada silinder, diukur temperatur masuk dan keluar untuk menentukan kalor yang dilepaskan ke air pendingin.

Misalkan w = berat air pendingin yang diberikan, kg/min

t_1 = temperatur masuk

t_2 = temperatur keluar

Kalor yang dilepaskan ke air pendingin:

$$= w (t_2 - t_1) \text{ kcal/min}$$

4. Kalor yang dibuang oleh gas buang

Berat gas pembuangan bisa diperoleh dengan menambahkan berat bahan bakar dan berat udara.

Misalkan W_1 = berat gas buang, kg/min

s = kalor spesifik gas buang

t = kenaikan temperatur

Kalor yang dibawa oleh gas buang:

$$= W_1 \times s \times t \text{ kcal/min}$$

5. Kalor yang tak terhitung

Selalu ada kerugian karena gesekan, kebocoran, radiasi dan sebagainya yang tidak bisa diukur secara eksperimen. Untuk melengkapi lembar kesetimbangan kalor, kerugian ini dicari dari perbedaan antara kalor yang diberikan dengan kalor yang diserap oleh IHP, air pendinginan dan gas buang.

Akhirnya, lembar kesetimbangan kalor dibuat seperti berikut ini:

No.	Uraian	Kalor dalam	
		kcal	%
	Kalor total yang diberikan	.....	100
1	Kalor yang diserap IHP	.....	.....
2	Kalor yang dilepaskan ke air pendinginan	.....	.....
3	Kalor yang dibuang oleh gas buang	.....	.....
4	Kalor yang tak terhitung	.....	.....

Contoh soal

Sebuah mesin pembakaran dalam menggunakan 6 kg bahan bakar per jam yang mempunyai nilai kalor 10.500 kcal/kg dalam satu jam. IHP yang dihasilkan adalah 25 hp. Temperatur 11,5 kg air pendingin naik sebesar 25⁰ C per menit. Temperatur 4,2 kg gas

buang dengan kalor spesifik 0,24 meningkat hingga 220⁰ C per menit. Buatlah lembar kesetimbangan kalor dari mesin ini.

Jawab

Diketahui: $W = 6 \text{ kg/h}$

$$C = 10.500 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{IHP} = 25 \text{ hp}$$

$$w = 11,5 \text{ kg}$$

$$(t_2 - t_1) = 25^0 \text{ C per menit}$$

$$W_1 = 4,2 \text{ kg}$$

$$s = 0,24$$

$$t = 220^0 \text{ C per menit}$$

Kalor yang disuplai bahan bakar:

$$= W \times C = \frac{6 \times 10500}{60} = 1050 \text{ kcal/min}$$

Kalor yang diserap oleh daya IHP:

$$= \frac{\text{IHP} \times 4500}{J} = \frac{25 \times 4500}{427}$$

$$= 263,5 \text{ kcal/min}$$

Kalor yang dilepas ke air pendingin:

$$= w (t_2 - t_1) = 11,5 \times 25 = 287,5 \text{ kcal/min}$$

Kalor yang hilang pada gas buang:

$$= W_1 \times s \times t = 4,2 \times 0,24 \times 220$$

$$= 221,8 \text{ kcal/min}$$

Kalor yang tak terhitung:

$$= 1050 - (263,5 + 287,5 + 221,8)$$

$$= 277,2 \text{ kcal/min}$$

Lembar kesetimbangan kalornya:

No.	Uraian	Kalor dalam	
		kcal	%
	Kalor total yang diberikan	1050	100
1	Kalor yang diserap IHP	263,5	25,1
2	Kalor yang dilepaskan ke air pendinginan	287,5	27,4
3	Kalor yang dibuang oleh gas buang	221,8	21,1
4	Kalor yang tak terhitung	277,2	26,4

Soal-soal

1. Apakah perbedaan antara mesin pembakaran dalam dengan mesin pembakaran luar.
2. Bagaimana mesin pembakaran dalam diklasifikasikan.
3. Apa yang anda ketahui tentang mesin siklus empat langkah dan mesin siklus dua langkah.
4. Apa perbedaan antara mesin diesel dengan mesin bensin.
5. Mesin pembakaran dalam siklus dua langkah mempunyai tekanan efektif rata-rata 6 kg/cm^2 . Kecepatan mesin adalah 1000 rpm. Jika diameter torak adalah 11 cm dan panjang langkah adalah 14 cm, carilah IHP yang dihasilkan.
6. Mesin bensin empat silinder bekerja dengan tekanan efektif rata-rata 5 bar dan kecepatan mesin 1250 rpm. Carilah daya indikated yang dihasilkan mesin, jika diameter torak 100 mm dan panjang langkah 150 mm.
7. Pada eksperimen laboratorium, pengamatan berikut dicatat selama pengujian mesin gas silinder satu:

Diameter silinder 10 cm, Langkah 18 cm, tekanan efektif rata-rata $6,5 \text{ kg/cm}^2$, jumlah pembakaran/min 250 dan BHP 4,5. Carilah:
 - a. IHP.
 - b. Efisiensi mekanik.

BAB 8

POMPA

Pompa bisa diklasifikasikan dengan berbagai cara. Jika pompa diklasifikasikan berdasarkan cara energi dipindahkan maka pompa bisa dikelompokkan sebagai berikut:

1. Pompa dinamik (Dynamics).
2. Pompa perpindahan (Displacement)

Pompa Dinamik

Energi secara kontinu diberikan untuk menaikkan kecepatan cairan/fluida. Selanjutnya akan terjadi penurunan kecepatan pada sisi keluar pompa. Pengelompokkan pompa dinamik secara skematik bisa dilihat pada gambar 1.

Pompa Perpindahan

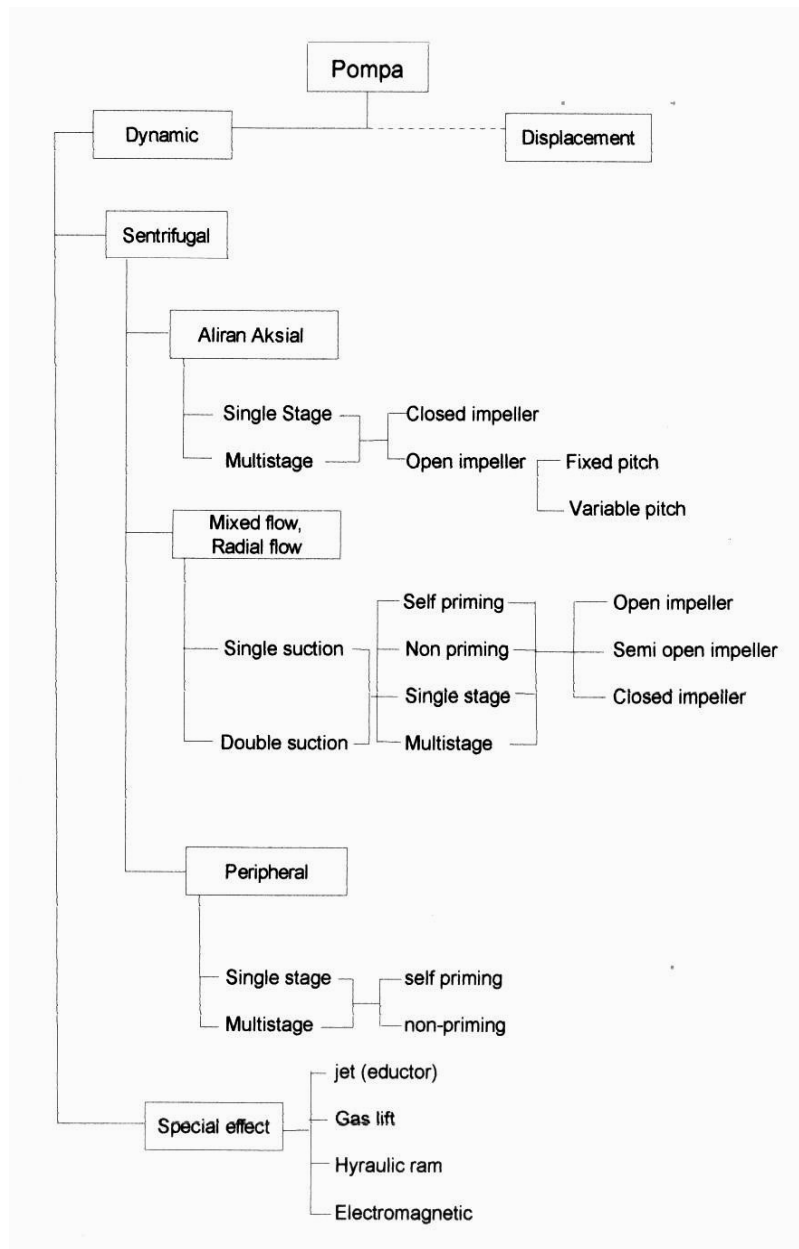
Energi secara periodik ditambahkan berupa gaya yang diberikan ke fluida. Selanjutnya akan dihasilkan penambahan tekanan secara langsung hingga fluida bisa dipindahkan. Pengelompokkan pompa perpindahan secara skematik bisa dilihat pada gambar 2.

Untuk pembahasan selanjutnya akan dibatasi hanya untuk pompa sentrifugal dan pompa resiprokal/torak.

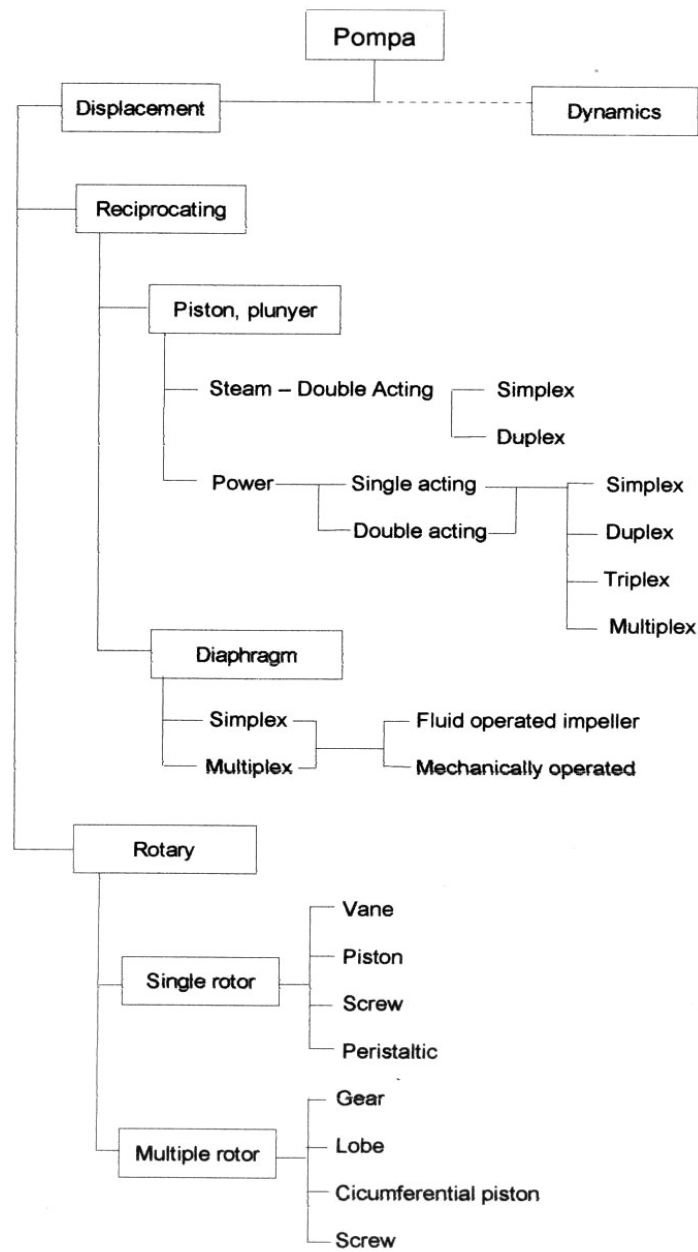
A. POMPA SENTRIFUGAL

Pompa bisa didefinisikan sebagai sebuah mesin, jika digerakkan oleh sumber daya dari luar, akan mengangkat air atau fluida lainnya dari tempat yang lebih rendah ke tempat yang lebih tinggi. Atau dengan kata lain, pompa adalah sebuah mesin yang merubah energi mekanik menjadi energi tekanan.

Pompa sentrifugal adalah pompa dimana proses menaikkan air dilakukan dengan aksi gaya sentrifugal.



Gambar 1. Klasifikasi pompa dinamik.



Gambar 2. Klasifikasi pompa perpindahan.

Sistem Pemipaan Pada Pompa Sentrifugal

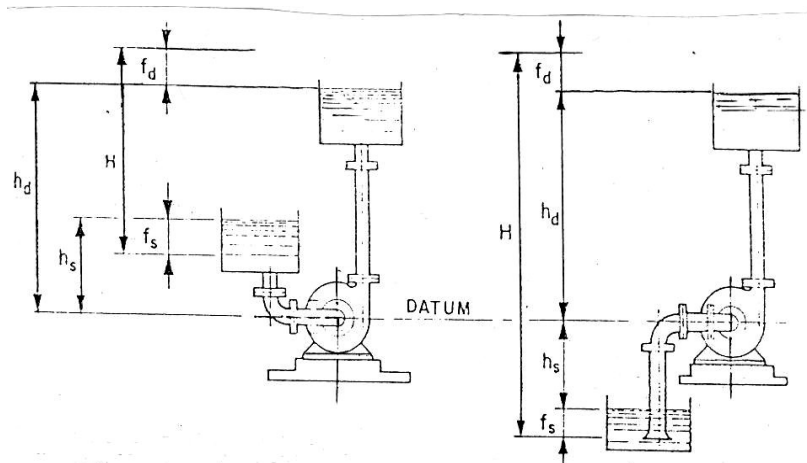
Bagus tidaknya kerja pompa sentrifugal bergantung pada pemilihan dan tata-letak yang benar sistem pemipaannya. Pada umumnya pompa mempunyai pipa hisap dan pipa hantar/buang.

(a) Pipa hisap.

Pipa hisap dari suatu pompa sentrifugal mempunyai peranan penting dalam keberhasilan kerja dari pompa tersebut. Rancangan yang buruk dari suatu pipa hisap akan menyebabkan “Net Positive Suction Head” (NPSH) yang tidak mencukupi, timbul getaran, suara berisik akibat pukulan air (water hammer), keausan dan sebagainya. Mengingat tekanan pada bagian masuk pompa adalah hisapan (negatif) dan katupnya harus dibatasi untuk menghindari kavitasi, maka harus diusahakan agar kerugian pada pipa hisap sekecil mungkin. Untuk maksud ini diusahakan agar diameter pipa hisap cukup besar dan dihindarkan adanya belokan.

(b) Pipa Hantar

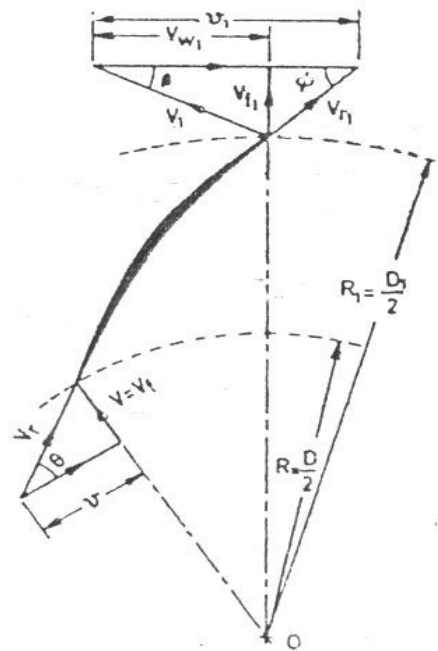
Sebuah katup searah (check valve) harus dipasang pada pipa hantar dalam posisi dekat dengan pompa dengan maksud untuk menghindari *water hammer* dan mengatur pengeluaran pompa. Ukuran dan panjang pipa hantar tergantung dari kebutuhan.



Gambar 3. Sistem pipa suatu pompa sentrifugal.

Kerja Pompa Sentrifugal

Kerja yang dilakukan atau daya yang diperlukan oleh pompa, dapat diketahui dengan cara menggambar segitiga kecepatan pada sisi masuk dan pada sisi keluar sudu pompa. Untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. segitiga kecepatan pada sisi masuk dan sisi keluar.

Keterangan gambar:

V = kecepatan absolut/mutlak air masuk sudu

D = diameter sudu pada sisi masuk

v = kecepatan tangensial sudu pada sisi masuk. Biasa juga disebut kecepatan keliling (peripheral velocity) pada sisi masuk sudu.

V_r = kecepatan relatif air terhadap roda sudu pada sisi masuk

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

$V_1, D_1, v_1, V_{r1}, V_{f1}$ = besaran yang berlaku untuk sisi keluar

N = kecepatan sudu dalam rpm

θ = sudut sudu pada sisi masuk

β = sudut pada saat air meninggalkan sudu

ϕ = sudut sudu pada sisi keluar

Karena air memasuki sudu dalam arah radial, maka kecepatan pusaran air pada sisi masuk $V_w = 0$.

V_{w1} = kecepatan pusaran air pada sisi keluar

- Kerja yang dilakukan per kg air adalah:

$$= \frac{V_{w1} \cdot v_1}{g} \text{ kg.m}$$

Dalam satuan SI, kerja yang dilakukan per kg air:

$$= V_{w1} \cdot v_1 \text{ Nm}$$

dimana:

V_{w1} dan v_1 dalam m/s.

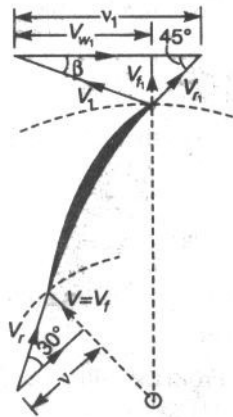
Contoh soal

Sebuah pompa sentrifugal mempunyai diameter impeller luar dan dalam masing-masing adalah 600 mm dan 300 mm. Sudut sudu sisi masuk dan sisi keluar masing-masing adalah 30° dan 45° . Jika air memasuki impeller pada kecepatan 2,5 m/s, carilah (a) kecepatan impeller, (b) kerja per kN air.

Jawab

Diketahui: $D_1 = 600 \text{ mm} = 0,6 \text{ m}$; $D = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$; $\theta = 30^\circ$; $\phi = 45^\circ$ dan $V = 2,5 \text{ m/s}$

(a) Kecepatan impeller



$$v = \frac{V}{\tan 30^\circ} = \frac{2,5}{0,5774} = 4,33 \text{ m/s}$$

$$4,33 = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 0,3 N}{60} = 0,0157 N$$

$$N = 4,33 / 0,0157 = 275,8 \text{ rpm}$$

(b) Kerja per kN air

Dari segitiga kecepatan:

$$v_1 = v \times \frac{D_1}{D} = 4,33 \times \frac{0,6}{0,3} = 8,66 \text{ m/s}$$

dan

$$V_{wl} = v_1 - \frac{V_{fl}}{\tan 45^\circ} = 8,66 - \frac{2,5}{1} = 6,16 \text{ m/s}$$

maka

$$W = \frac{V_{wl} \times v_1}{g} = \frac{6,16 \times 8,66}{9,81} = 5,44 \text{ kN-m} = 5,44 \text{ kJ}$$

Tinggi Tekan Manometrik

Istilah Tinggi-tekan Manometrik atau Manometric Head merupakan hal yang penting dalam pembahasan pompa sentrifugal. Manometrik head adalah tinggi-tekan yang nyata/sebenarnya (actual head) yang harus diatasi pompa.

Manometrik head:

$$H_m = H_s + H_{fs} + H_d + H_{fd} + \frac{V_d^2}{2g}$$

dimana : H_s = tinggi hisap

H_{fs} = kerugian tinggi tekan (loss of head) pada pipa hisap (suction pipe) akibat gesekan

H_d = tinggi hantar (delivery lift)

H_{fd} = kerugian tinggi-tekan pada pipa hantar akibat gesekan

V_d = kecepatan air dalam pipa hantar

g = gravitasi

Manometrik head dapat juga diartikan sebagai:

H_m = work done/kg air - losses dalam sudu (impeller losses)

$$= \frac{V_{wl} \cdot v_1}{g} - \text{impeller losses}$$

atau :

H_m = energi/kg pada sisi keluar sudu – energi/kg pada sisi masuk sudu

Efisiensi Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal mempunyai tiga macam efisiensi sebagai berikut:

1. Efisiensi manometrik.
2. Efisiensi mekanik.
3. Efisiensi keseluruhan.

Efisiensi manometrik

Adalah rasio antara head manometrik dengan energi sudu/kg air, yang secara matematik dapat dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{H_m}{\frac{V_{wl} \cdot v_1}{g}}$$

Efisiensi mekanik

Adalah rasio antara energi tersedia pada sudu dengan energi yang diberikan pada sudu oleh penggerak mula.

Efisiensi keseluruhan, η_o

Adalah rasio antara kerja sebenarnya yang dilakukan oleh pompa dengan energi yang diberikan pada pompa oleh penggerak mula.

Kapasitas Pompa Sentrifugal

Kapasitas atau *discharge* dari suatu pompa sentrifugal dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

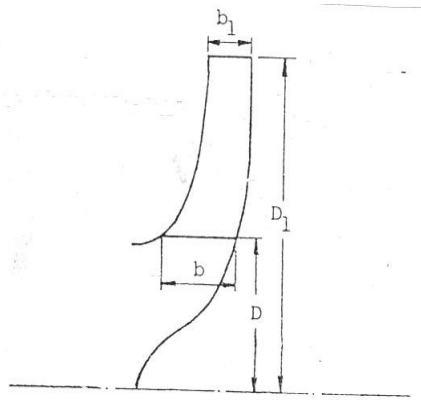
$$Q = \pi D b V_f = \pi D_1 b_1 V_{f1}$$

Dimana : D = diameter sudu pada sisi masuk

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

b = lebar sudu pada sisi masuk

D_1, V_{f1}, b_1 = besaran yang berlaku untuk sisi keluar



Gambar 5. Sudu pompa.

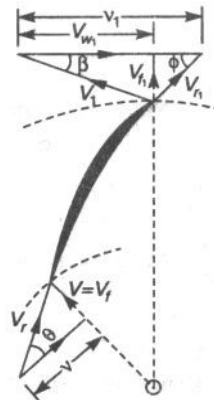
Contoh soal

Sebuah pompa sentrifugal mengeluarkan air pada kecepatan 110 liter/s pada kecepatan 1450 rpm dengan head 23 meter. Diameter impeller adalah 250 mm dengan lebar 50 mm. Jika efisiensi manometrik 75%, carilah sudut sudu pada sisi keluar.

Jawab

Diketahui: $Q = 110 \text{ liter/s} = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$; $N = 1450 \text{ rpm}$; $H_m = 23 \text{ m}$; $D_1 = 250 \text{ mm} = 0,25 \text{ m}$; $b_1 = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$ dan $\eta_{man} = 75\% = 0,75$

Tanya: $\phi = \dots\dots ?$



$$v_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi \times 0,25 \times 1450}{60} = 19 \text{ m/s}$$

Debit pompa:

$$Q = \pi D_1 b_1 V_{f1}$$

$$0,11 = \pi \times 0,25 \times 0,05 \times V_f$$

$$= 0,039 V_f$$

$$V_f = 0,11 / 0,039 = 2,8 \text{ m/s}$$

Dari efisiensi manometrik:

$$\eta = \frac{H_m}{\frac{V_{w1} \cdot v_1}{g}}$$

$$0,75 = \frac{H_m}{\frac{V_{w1} \cdot v_1}{g}} = \frac{23}{\frac{V_{w1} \cdot 19}{9,81}} = \frac{11,9}{V_{w1}}$$

$$V_{w1} = 11,9 / 0,75 = 15,9 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan diperoleh:

$$\tan \phi = \frac{V_{fl}}{v_1 - V_{w1}} = \frac{2,8}{19 - 15,9} = 0,9032 \quad \text{atau}$$

$$\phi = 42,1^\circ$$

Daya Penggerak Pompa Sentrifugal

Daya atau *horse power* yang diperlukan untuk menggerakkan suatu pompa sentrifugal, besarnya dapat dihitung dari manometric head atau dengan cara menggambar segitiga kecepatan. Besar daya yang diperlukan oleh pompa dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$P = \frac{wQH_m}{75 \cdot \eta_o} \quad \text{HP}$$

$$\text{SI:} \quad P = \frac{wQH_m}{\eta_o} \quad \text{kW}$$

dimana : H_m = manometric head dalam meter

Q = kapasitas pompa dalam m³/detik

η_o = efisiensi keseluruhan pompa

atau dapat juga dengan menggunakan rumus berikut:

$$P = \frac{\text{Discharge dalam kg} \times \text{Work done/kg air}}{75}$$

$$P = \frac{wQ \cdot V_{w1} \cdot v_1}{g \times 75} \quad \text{HP}$$

atau:

$$P = \frac{wQ \cdot V_{wl} \cdot v_1}{g} \quad \text{kW}$$

Contoh soal

Sebuah pompa sentrifugal diharuskan memompa air sampai head total 40 meter dengan debit 50 liter/s. Carilah daya yang diperlukan pompa, jika efisiensi keseluruhan 62%.

Jawab

Diketahui: $H_m = 40$ m; $Q = 50$ liter/s = $0,5$ m³/s; $\eta_o = 62\% = 0,62$

Daya yang diperlukan pompa:

$$P = \frac{wQ \cdot H_m}{\eta_o} = \frac{9,81 \times 0,05 \times 40}{0,62} = 31,6 \quad \text{kW}$$

Contoh soal

Sebuah pompa sentrifugal memompa 30 liter air per detik ke ketinggian 18 meter melalui pipa sepanjang 90 meter dan diameter 100 mm. Jika efisiensi pompa 75%, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa. Ambil $f = 0,012$.

Jawab

Diketahui: $Q = 30$ liter/s = $0,03$ m³/s; $H = 18$ m; $l = 90$ m; $d = 100$ mm = $0,1$ m; $\eta_o = 75\% = 0,75$; dan $f = 0,012$

- luas penampang pipa:

$$a = \frac{\pi}{4} \times (d)^2 = \frac{\pi}{4} \times (0,1)^2 = 7,854 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2$$

- dan kecepatan air:

$$v = \frac{Q}{a} = \frac{0,03}{7,854 \times 10^{-3}} = 3,82 \quad \text{m/s}$$

- head manometrik:

$$H_m = H + \text{kerugian dalam pipa} + \text{kerugian head pada sisi keluar}$$

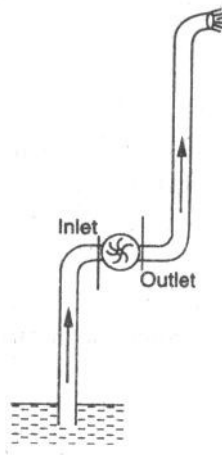
$$\begin{aligned}
 &= 18 + \frac{4fv^2}{2gd} + \frac{v^2}{2g} \\
 &= 18 + \frac{4 \times 0,012 \times 90 \times (3,82)^2}{2 \times 9,81 \times 0,1} + \frac{(3,82)^2}{2 \times 9,81} \\
 &= 18 + 32,1 + 0,74 = 50,84 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan pompa:

$$P = \frac{wQH_m}{\eta_o} = \frac{9,81 \times 0,03 \times 50,84}{0,75} = 19,9 \text{ kW}$$

Kenaikan Tekanan Air

Air yang mengalir dalam sudu suatu pompa sentrifugal akan mengalami kenaikan tekanan. Hal ini terjadi karena pompa mengubah energi mekanis menjadi energi tekanan. Energi tekanan ini diberikan oleh sudu kepada air yang mengalir melalui sudu.



Berdasarkan persamaan Bernoulli untuk sisi masuk dan sisi keluar sudu pompa, dapat ditulis bahwa:

$$\text{Energi pada sisi keluar} = \text{Energi pada sisi masuk} + \text{Kerja yg dilakukan sudu}$$

Atau :

$$\frac{P_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P}{w} + \frac{V^2}{2g} + \frac{V_{w1} \cdot v}{g} \quad (\text{diambil } Z_1 = Z)$$

$$\frac{P_1}{w} - \frac{P}{w} = \frac{V^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + \frac{V_{w1} \cdot v}{g}$$

Persamaan ini menunjukkan adanya kenaikan tekanan air sebesar:

$$\left(\frac{P_1}{w} - \frac{P}{w} \right)$$

pada saat mengalir melalui sudu pompa sentrifugal.

Contoh soal

Sebuah pompa sentrifugal mempunyai impeller dengan diameter dalam dan luar masing-masing 150 mm dan 250 mm. Pompa memompa air sebesar 50 liter per detik pada 1500 rpm. Kecepatan aliran melalui impeller adalah konstan pada 2,5 m/s. Sudu berbentuk kurva melengkung ke belakang dengan sudut 30° terhadap tangen sisi keluar. Diameter pipa hisap dan hantar masing-masing adalah 150 mm dan 100 mm. Head tekanan pada sisi hisap 4 m dibawah atmosfer dan sisi hantar 18 m di atas atmosfer. Daya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa adalah 18 kW. Carilah (i) sudut sudu sisi masuk, (ii) head manometrik, dan (iii) efisiensi manometrik.

Jawab

Diketahui: $D = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$; $D_1 = 250 \text{ mm} = 0,25 \text{ m}$; $Q = 50 \text{ liter/s} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$; $N = 1500 \text{ rpm}$; $V_f = V_{f1} = 2,5 \text{ m/s}$; $\phi = 30^\circ$; $d_s = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$; $d_d = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$;

$$p/w = H_{atm} - 4 = 10,3 - 4 = 6,3 \text{ m}$$

$$p1/w = H_{atm} + 18 = 10,3 + 18 = 28,3 \text{ m}$$

$$P = 18 \text{ kW}$$

(i) sudut sudu sisi masuk:

$$v = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 0,15 \times 1500}{60} = 11,8 \text{ m/s}$$

dari segitiga kecepatan:

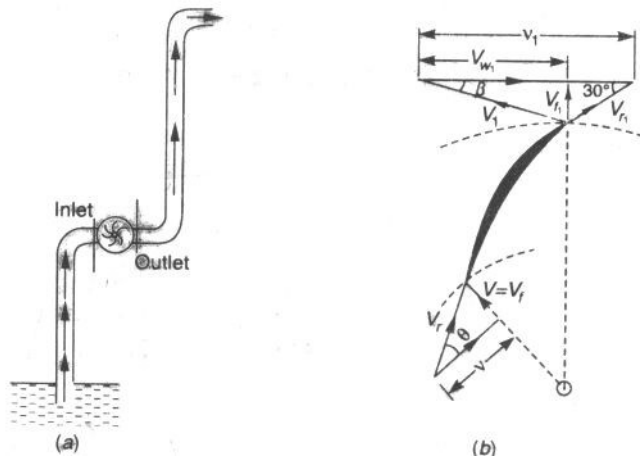
$$\tan \theta = \frac{V_f}{v} = \frac{2,5}{11,8} = 0,2119 \quad \text{atau } \theta = 12^\circ$$

(ii) head manometrik:

pipa hisap:

$$a_s = \frac{\pi}{4} (d_s)^2 = \frac{\pi}{4} (0,15)^2 = 17,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{a} = \frac{0,05}{17,67 \times 10^{-3}} = 2,83 \text{ m/s}$$



pipa hantar:

$$a_d = \frac{\pi}{4} (d_d)^2 = \frac{\pi}{4} (0,1)^2 = 7,854 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{Q}{a_d} = \frac{0,05}{7,854 \times 10^{-3}} = 6,37 \text{ m/s}$$

dengan menggunakan persamaan Bernoulli:

$$\frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p}{w} + \frac{V^2}{2g} + H_m$$

$$H_m = \left(\frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{p}{w} + \frac{V^2}{2g} \right)$$

$$= \left(28,3 + \frac{(6,37)^2}{2 \times 9,81} \right) - \left(6,3 + \frac{(2,83)^2}{2 \times 9,81} \right)$$

$$= 30,4 - 6,7 = 23,7 \text{ m}$$

(iii) efisiensi manometrik:

dari segitiga kecepatan:

$$v_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi \times 0,25 \times 1500}{60} = 19,6 \text{ m/s}$$

$$V_{wl} = v_1 - \frac{V_{fl}}{\tan \theta} = 19,6 - \frac{2,5}{\tan 30^\circ} = 19,6 - \frac{2,5}{0,5774} \text{ m/s}$$

$$= 15,3 \text{ m/s}$$

$$\eta_{man} = \frac{H_m}{\frac{V_{wl} \cdot v_1}{g}} = \frac{23,7}{\frac{15,3 \times 19,6}{9,81}} = 0,772$$

$$= 77,2\%$$

Kecepatan Start Minimum

Suatu pompa sentrifugal akan mulai mengalirkan cairan apabila head yang dibangkitkan sama besarnya dengan manometric head. Pada saat start, kecepatan cairan adalah sama dengan nol, maka *pressure head* yang diakibatkan oleh gaya sentrifugal adalah:

$$= \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v^2}{2g}$$

$$= \frac{v_1^2 - v^2}{2g}$$

Pressure head ini harus sama dengan manometric head yang diminta. Sehingga:

$$\frac{v_1^2 - v^2}{2g} = H_m$$

sedangkan:

$$\eta_{man} = \frac{H_m}{\frac{V_{wl} \cdot v_1}{g}}$$

maka:

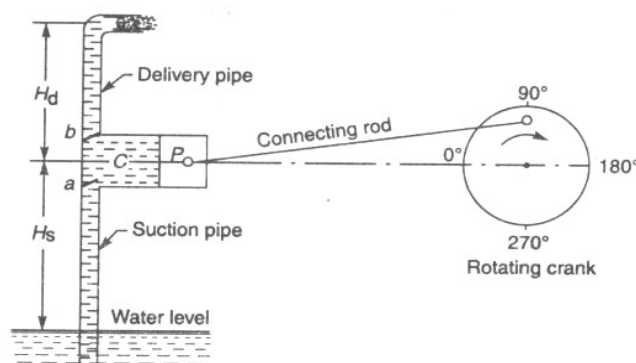
$$\frac{v_1^2 - v^2}{2g} = \eta_m \frac{V_{wl} \cdot v_1}{g}$$

Pompa Sentrifugal Bertingkat Ganda

Untuk menaikkan head pompa sentrifugal, dapat dibuat konstruksi bertingkat ganda atau biasa disebut sebagai *Multistage pump*. Dalam suatu multistage pump, sudu-sudu dipasang pada satu poros dan diletakkan dalam rumah pompa yang sama. Head yang dibangkitkan oleh tiap sudu adalah sama dengan Total Head dibagi dengan jumlah sudu (atau tingkatnya).

POMPA TORAK

Pompa torak dalam bentuknya yang sederhana, terdiri dari beberapa bagian seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 6. Komponen-komponen pompa torak.

Keterangan gambar:

- Silinder *C*, didalamnya ada torak *P*. Gerakan torak diperoleh dengan adanya batang penghubung yang menghubungkan torak dengan engkol berputar.
- Pipa hisap, menghubungkan sumber air dengan silinder.
- Pipa hantar untuk mengalirkan air keluar dari pompa.
- Katup (valve) *a*, mengatur aliran ke dalam silinder.
- Katup *b*, mengatur aliran keluar dari silinder.

Pompa torak juga dinamakan pompa perpindahan positif (*positive displacement pump*), karena mengalirkan/mempompakan sejumlah volume yang tertentu dari suatu cairan selama langkah toraknya.

Jenis-jenis Pompa Torak

Pompa torak dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Berdasarkan gerakan air.

- a. Pompa aksi tunggal (single acting pump).
 - b. Pompa aksi ganda (double acting pump).
2. Berdasarkan jumlah silinder.
 - a. Pompa silinder tunggal.
 - b. Pompa silinder ganda.
 - c. Pompa silinder tiga, dsbnya.
 3. Berdasarkan penggunaan bejana udara (air vessel).
 - a. Dengan bejana udara.
 - b. Tanpa bejana udara.

Kapasitas Pompa Torak

Dalam pembahasan berikut dianggap bahwa pompa adalah suatu pompa torak aksi tunggal.

Jika ditentukan:

A = luas penampang torak

L = panjang langkah torak

N = jumlah putaran engkol per menit

Maka kapasitas pompa (discharge of pump) adalah:

$$Q = \frac{LAN}{60} \text{ m}^3/\text{s}$$

Untuk pompa torak aksi ganda, maka kapasitasnya adalah:

$$Q = \frac{2LAN}{60} \text{ m}^3/\text{s}$$

Slip Pada Pompa

Perbedaan antara kapasitas pompa teoritik dengan kapasitas pompa sebenarnya disebut dengan *slip pompa*. Suatu saat kapasitas pompa sebenarnya lebih besar daripada kapasitas pompa teoritik. Jika hal ini terjadi, maka slip pompa disebut sebagai slip negatif.

Contoh soal

Sebuah pompa torak aksi tunggal mempunyai diameter torak 300 mm dan langkah 200 mm. Jika kecepatan pompa 30 rpm dan mengeluarkan air 6,5 liter/s, carilah koefisien buang dan persen slip pompa.

Jawab

Diketahui: $D = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$; $L = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$; $N = 30 \text{ rpm}$; dan $Q_{act} = 6,5 \text{ liter/s} = 0,0065 \text{ m}^3/\text{s}$, dimana Q_{act} = debit aktual

- Koefisien buang/hantar, C_d :

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D)^2 = \frac{\pi}{4} (0,3)^2 = 0,0707 \text{ m}^2$$

Q_{th} = debit teoritis

$$Q_{th} = \frac{LAN}{60} = \frac{0,2 \times 0,0707 \times 30}{60} = 0,0071 \text{ m}^3/\text{s}$$

maka:

$$C_d = \frac{Q_{ac}}{Q_{th}} = \frac{0,0065}{0,0071} = 0,92$$

- persentase slip:

$$= \frac{Q_{th} - Q_{ac}}{Q_{th}} = \frac{0,0071 - 0,0065}{0,0071} = 0,085 = 8,5 \%$$

Daya Penggerak Pompa Torak

Suatu pompa torak bila bekerja, mula-mula menghisap cairan melalui pipa hisap dan kemudian memompa cairan tersebut keluar melalui pipa hantar.

Jika: H_s = head hisap pompa dalam meter

H_d = head hantar/buang pompa dalam meter

w = berat spesifik cairan

Q = debit cairan, m^3/s

Gaya pada torak pada langkah pemompaan/maju adalah:

$$= w \cdot H_d \cdot A \text{ kg (SI : kN)}$$

dan gaya torak pada langkah penghisapan/mundur adalah:

$$= w.H_s.A \quad \text{kg (SI : kN)}$$

Kerja yang dilakukan oleh pompa adalah:

$$= w.Q (H_s + H_d) \quad \text{kg.m (SI : kN-m)}$$

Daya teoritik yang diperlukan untuk menggerakkan pompa adalah sebesar:

$$= \frac{wQ(H_s + H_d)}{75} \quad \text{HP}$$

Dalam SI:

$$P = w Q (H_s + H_d) \quad \text{kW}$$

Daya sebenarnya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa selalu lebih besar daripada gaya teoritis, karena adanya bermacam-macam kerugian (losses).

Contoh soal

Sebuah pompa torak aksi ganda mempunyai langkah 300 mm dan diameter piston 150 mm. Head hantar dan hisap masing-masing adalah 26m dan 4m, termasuk head gesekan. Jika pompa bekerja pada 60 rpm, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa dengan efisiensi 80%

Jawab

Diketahui: $L = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$; $D = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$; $H_d = 26 \text{ m}$; $H_s = 4 \text{ m}$; $N = 60$ rpm dan $\eta = 80\% = 0,8$

Luas penampang piston:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D)^2 = \frac{\pi}{4} (0,15)^2 = 0,0177 \quad \text{m}^2$$

Debit teoritis:

$$Q = \frac{2LAN}{60} = \frac{2 \times 0,3 \times 0,0177 \times 60}{60} = 0,011 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Daya teoritis untuk menggerakkan pompa:

$$= wQ(H_s + H_d) = 9,81 \times 0,011 \times (4 + 26) = 3,24 \text{ kW}$$

Daya sebenarnya:

$$= \frac{3,24}{0,8} = 4,05 \text{ kW}$$

Diagram Indikator Pompa Torak

Sebagai akibat gerakan torak dalam langkah penghisapan, maka tekanan di dalam silinder menjadi lebih kecil daripada tekanan atmosfer. Sedangkan dalam langkah pemompaan tekanan di dalam silinder akan naik melebihi tekanan atmosfer.

Gambar 7 menunjukkan diagram indikator suatu pompa torak dengan aksi tunggal.

Keterangan gambar:

H_s = head hisap pompa

H_d = head hantar pompa

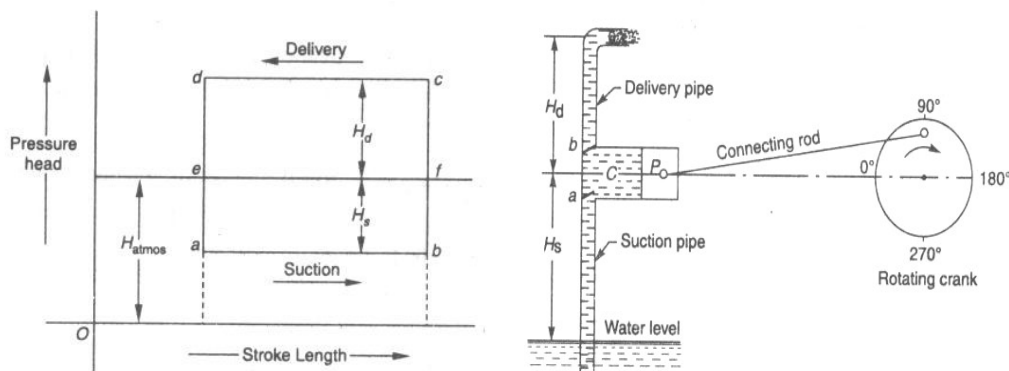
L = panjang langkah

Kerja yang dilakukan pompa adalah:

$$= w \cdot Q (H_s + H_d)$$

$$= \frac{wLAN}{60} (H_s + H_d)$$

Dengan demikian dapat terlihat bahwa indikator diagram dapat menunjukkan kerja yang dilakukan oleh pompa torak.

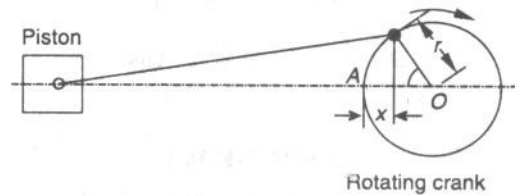


Gambar 7. Diagram indikator.

Perubahan Tekanan Akibat Percepatan Torak

Torak dihubungkan dengan poros engkol oleh suatu batang penghubung. Akibat konstruksi ini, gerakan torak akan merupakan suatu gerakan harmonik yang sederhana (simple harmonic motion). Pada titik matinya, kecepatan torak akan sama dengan nol, dan

pada pertengahan gerakannya, kecepatan torak akan mencapai maksimum. Pada awal gerakannya torak akan mendapat percepatan, dan pada akhir gerakannya torak akan mengalami perlambatan. Percepatan dan perlambatan pada torak akan mengakibatkan perubahan tekanan pada pipa masuk dan pipa keluar.



Gambar 8. Piston dan engkol.

Jika ditentukan:

A = luas penampang silinder

a = luas penampang pipa

ω = kecepatan sudut dari poros engkol dalam radian/s

r = jari-jari engkol

l = panjang pipa

Bila ditentukan bahwa engkol berputar dimulai dari titik A. Setelah t detik, engkol telah berputar θ radian.

$$\theta = \omega t$$

Perpindahan torak dalam t detik adalah:

$$x = r - r \cos \theta = r - r \cos \omega t$$

Diketahui kecepatan torak adalah:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega r \sin \omega t$$

dan percepatan torak adalah:

$$= \frac{dv}{dt} = \omega^2 r \cos \omega t$$

Karena aliran air di dalam pipa adalah sama dengan aliran air di dalam silinder, maka kecepatan air di dalam pipa:

$$= \frac{A}{a} \times \text{kecepatan torak} = \frac{A}{a} \times \omega r \sin \omega t$$

Percepatan air dalam pipa:

$$= \frac{A}{a} \times \omega^2 r \cos \omega t$$

Berat air dalam pipa adalah:

$$= w a l$$

dan massa air dalam pipa adalah:

$$= \frac{w a l}{g}$$

Jadi:

Gaya percepatan = massa x percepatan

$$= \frac{w a l}{g} \times \frac{A}{a} \omega^2 r \cos \omega t$$

dan intensitas tekanan akibat percepatan adalah:

$$= \frac{\text{gaya percepatan}}{\text{luas}}$$

$$= \frac{w l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r \cos \omega t$$

dan tinggi tekan akibat percepatan adalah:

$$H_a = \frac{\text{intensitas tekanan}}{\text{Berat spesifik cairan}}$$

$$= \frac{l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r \cos \omega t$$

$$= \frac{l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r \cos \theta$$

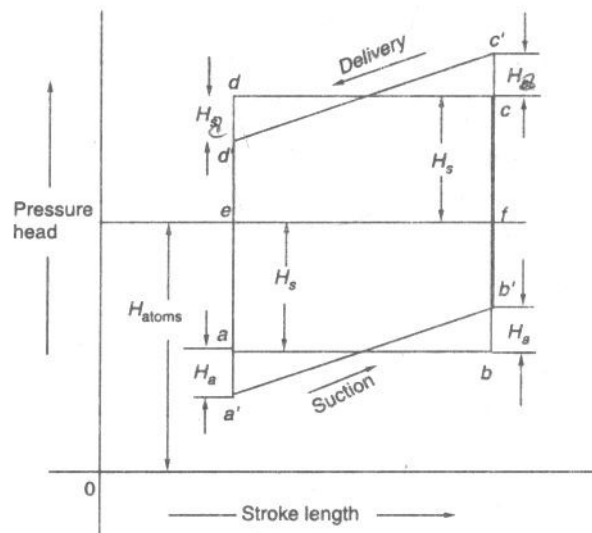
Catatan :

1. Pada saat $\theta = 0^\circ$; $H_a = \frac{l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r$
2. Pada saat $\theta = 90^\circ$; $H_a = 0$
3. Pada saat $\theta = 180^\circ$; $H_a = - \frac{l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r$

Pengaruh Percepatan Torak Terhadap Diagram Indikator

Dapat dilihat pada pembahasan sebelumnya bahwa perubahan tinggi tekan akibat percepatan disebabkan oleh percepatan torak.

Dapat dilihat pula bahwa pada permulaan langkah hisap, tinggi tekan (pressure head) adalah dibawah tinggi tekan atmosfer sebesar $(H_s + H_a)$, dimana H_a adalah *acceleration pressure head*.



Gambar 9. Pengaruh percepatan torak pada diagram indikator.

Pada pertengahan langkah hisap, pressure head berada dibawah pressure head atmosfer sebesar H_s ($H_a = 0$). Pada akhir langkah hisap, head tekanan berada dibawah atmosfer sebesar $(H_s - H_a)$. Dengan demikian kita dapat mengubah diagram indikator untuk langkah hisap dan langkah tekan seperti gambar 9. Dengan cara yang sama, hal tersebut berlaku pada langkah tekan.

Contoh soal

Sebuah pompa torak aksi tunggal mempunyai diameter torak 125 mm dan langkah 300 mm menghisap air dari kedalaman 4 meter dari sumbu silinder pada putaran 24 rpm. Panjang dan diameter pipa hisap masing-masing adalah 9 meter dan 75 mm. Carilah head tekanan pada piston pada langkah awal dan akhir jika barometer menunjukkan 10,3 m air.

Jawab

Diketahui: $D = 125 \text{ mm} = 0,125 \text{ m}$; $L = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$; jari-jari poros engkol (r) = $0,3/2 = 0,15 \text{ m}$ (karena panjang langkah adalah dua kali jari-jari poros engkol); $H_s = 4 \text{ m}$; $N = 24 \text{ rpm}$; $l = 9 \text{ m}$; $d = 75 \text{ mm} = 0,075 \text{ m}$; bacaan barometer, $H = 10,3 \text{ m}$.

luas penampang torak:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D)^2 = \frac{\pi}{4} (0,125)^2 = 0,0123 \text{ m}^2$$

luas penampang pipa hisap:

$$a = \frac{\pi}{4} \times (d)^2 = \frac{\pi}{4} (0,075)^2 = 0,0044 \text{ m}^2$$

kecepatan angular poros:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi \times 24}{60} = 0,8\pi \text{ rad/s}$$

percepatan head tekanan:

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{l}{g} \times \frac{A}{a} \omega^2 r = \frac{9}{9,81} \times \frac{0,0123}{0,0044} \times (0,8\pi)^2 \times 0,15 \\ &= 2,4 \text{ m} \end{aligned}$$

head torak pada permulaan langkah torak:

$$H_{torak} = H - (H_s + H_a) = 10,3 - (4 + 2,4) = 3,9 \text{ m}$$

head tekanan pada akhir langkah torak:

$$H_{torak} = H - (H_s - H_a) = 10,3 - (4 - 2,4) = 8,7 \text{ m}$$

Kecepatan Maksimum Poros Engkol

Telah dibahas dimuka bahwa pada saat dimulainya langkah hisap, pressure head berada dibawah tekanan atmosfir sebesar $(H_s + H_a)$, dimana H_s adalah head hisap dan H_a adalah head akselerasi. Secara eksperimen telah didapat bahwa jika tinggi hisap pompa $(H_s + H_a)$ mencapai 7,8 meter air atau 2,5 meter absolut $[H - (H_s + H_a)]$, maka kontinuitas aliran akan berhenti. Pemisahan/separasi akan terjadi, karena air akan menguap. Kejadian ini disebut *separasi* atau *kavitasi*, dan harus dihindari. Head dimana terjadi separasi atau kavitasi dinamakan head separasi yang dinyatakan dengan:

$$H_{sep} = H - (H_s + H_a) = H - H_s - H_a$$

Biasanya pada suatu pompa torak, head hisap adalah konstan. Untuk menghindari terjadinya kavitasi pada saat awal langkah hisap, maka head akselerasi harus dibatasi. Telah kita ketahui bahwa head akselerasi adalah:

$$H_a = \frac{l}{g} \frac{A}{a} \omega^2 r$$

Untuk membatasi head akselerasi, maka kita harus membatasi nilai ω , dengan pengertian bahwa nilai yang lainnya adalah konstan.

Mengingat bahwa kecepatan sudut poros engkol adalah:

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60}$$

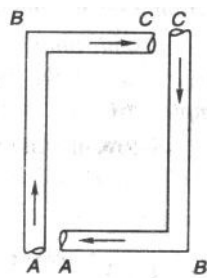
maka bila kita membatasi nilai ω , berarti kita membatasi nilai N , yaitu kecepatan putaran poros engkol. Dengan kata lain, kita dapat menghitung kecepatan maksimum poros engkol untuk menghindari kavitasi.

Dapat kita lihat juga bahwa pressure head maksimum di dalam pipa hantar pada saat akhir langkah tekan adalah sebesar $(H + H_d - H_a)$.

Secara eksperimental telah didapat bahwa jika tinggi tekan absolut lebih kecil dari 2,5 meter air, kontinuitas aliran akan berhenti dan akan terjadi kavitasi. Head dimana terjadi kavitasi dinamakan separation head yang dinyatakan dengan:

$$H_{sep} = H + H_d - H_a$$

Pompa torak biasanya dipergunakan untuk memompa air melalui berbagai macam tipe pipa hantar. Dua tipe pipa hantar yang sering dipakai adalah seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 10. Tipikal pipa hantar.

Dalam gambar 10(a) pipa hantar mula-mula keatas, kemudian dibengkokkan kearah mendatar. Delivery head pada titik B ini akan sama dengan nol, dan akan terjadi suatu head akselerasi. Jadi pada titik B akan selalu ada kemungkinan terjadinya separasi atau kavitasi. Sedangkan dalam gambar 10(b) pipa hantar mula-mula diletakkan mendatar,

kemudian dibengkokkan ke arah vertikal. Dalam keadaan ini tidak ada kemungkinan akan terjadinya kavitasi pada titik B, karena pada titik ini hanya terjadi *delivery head*.

Pengaruh Gesekan Terhadap Diagram Indikator

Jika air mengalir melalui suatu pipa, maka selalu terjadi kerugian pada head (loss of head) akibat gesekan dengan pipa, yang menyebabkan hambatan terhadap aliran air.

Demikian pula akan terjadi pada suatu pompa torak, dimana air mengalir melalui pipa hisap dan pipa hantar. Pada kedua pipa tersebut akan terjadi suatu kerugian head akibat gesekan.

Jika ditentukan:

A = luas penampang silinder

d = diameter pipa

a = luas penampang pipa

ω = kecepatan sudut dari poros engkol dalam radian/s

r = jari-jari engkol

l = panjang pipa

f = koefisien gesekan

v = kecepatan air di dalam pipa

Diketahui bahwa kecepatan torak pada suatu saat adalah :

$$= \omega r \sin \omega t = \omega r \sin \theta$$

Jadi kecepatan air dalam pipa suatu saat adalah:

$$v = \frac{A}{a} \omega r \sin \theta$$

Diketahui bahwa kerugian head akibat gesekan :

$$H_f = \frac{4flv^2}{2gd}$$

$$H_f = \frac{4fl}{2gd} \left(\frac{A}{a} \omega r \sin \theta \right)^2$$

Pengaruh gesekan pipa terhadap diagram indikator dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Pada awal langkah, $\theta = 0^\circ$

Kecepatan air dalam pipa sama dengan nol, berarti tidak ada kerugian akibat gesekan.

2. Pada pertengahan langkah, $\theta = 90^\circ$, maka $\sin \theta = 1$, kerugian head akibat gesekan:

$$H_f = \frac{4fl}{2gd} \left(\frac{A}{a} \omega r \right)^2$$

3. Pada akhir langkah, $\theta = 180^\circ$,

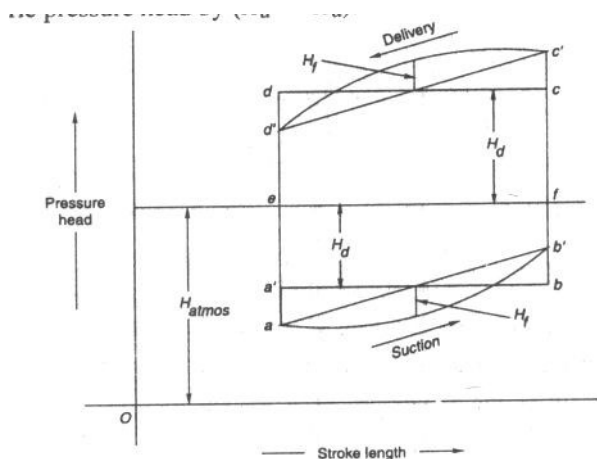
Kecepatan air dalam pipa sama dengan nol, berarti tidak ada kerugian head akibat gesekan.

Berdasarkan pengaruh yang disebabkan diatas, maka dapat dipertimbangkan beberapa koreksi terhadap diagram indikator sebagai berikut:

Pada Langkah Hisap :

Pada awal langkah hisap, pressure head berada di bawah tekanan atmosfer sebesar $(H_s + H_a)$, karena H_f akan sama dengan nol. Pada pertengahan langkah hisap, pressure head berada dibawah tekanan atmosfer sebesar $(H_s + H_f)$, karena H_a akan sama dengan nol. Pada akhir langkah hisap, pressure head berada dibawah tekanan atmosfer sebesar $(H_s - H_a)$, karena H_f akan sama dengan nol.

Dengan demikian kita dapat mengubah diagram indikator untuk langkah hisap seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Pengaruh gesekan pada ppa hisa dan hantar pada diagram indikator.

Pada Langkah Tekan:

Pada awal langkah tekan, pressure head berada diatas tekanan atmosfer sebesar ($H_d + H_a$), karena H_f akan sama dengan nol. Pada pertengahan langkah tekan, pressure head berada diatas tekanan atmosfer sebesar ($H_d + H_f$), karena H_a akan sama dengan nol. Pada akhir langkah tekan, pressure head akan berada diatas tekanan atmosfer sebesar ($H_d - H_a$), karena H_f akan sama dengan nol.

Dengan demikian kita dapat mengubah diagram indikator untuk langkah tekan seperti pada gambar 11.

Contoh soal

Sebuah pompa torak aksi tunggal mempunyai piston dengan diameter 200 mm dan panjang langkah 300 mm. Pipa hisap mempunyai diameter 100 mm dan panjang 8 meter. Pompa menghisap air pada level 4 meter dibawah sumbu silinder pada 30 rpm. Carilah tekanan pada torak pada:

- awal langkah hisap.
- ditengah-tengah langkah hisap.
- pada akhir langkah hisap.

Ambil harga $f = 0,01$ dan tekanan atmosfer = 10,3 meter air

Jawab

Diketahui: $D = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$; $L = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$; jari-jari poros engkol (r) = $0,3/2 = 0,15 \text{ m}$ (karena panjang langkah adalah dua kali jari-jari poros engkol); $d = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$; $H_s = 4 \text{ m}$; $N = 30 \text{ rpm}$; $l = 8 \text{ m}$; $f = 0,01$; $H = 10,3 \text{ m}$.

- Tekanan di awal langkah hisap

luas penampang torak:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D)^2 = \frac{\pi}{4} (0,2)^2 = 0,03142 \text{ m}^2$$

luas penampang pipa hisap:

$$a = \frac{\pi}{4} \times (d)^2 = \frac{\pi}{4} (0,1)^2 = 0,00785 \text{ m}^2$$

kecepatan angular poros:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi \times 30}{60} = \pi \text{ rad/s}$$

percepatan head tekanan:

$$H_a = \frac{l}{g} \times \frac{A}{a} \omega^2 r = \frac{8}{9,81} \times \frac{0,03142}{0,00785} \times (\pi)^2 \times 0,15$$

$$= 4,8 \text{ m}$$

head torak pada permulaan langkah torak:

$$H_{torak} = H - (H_s + H_a) = 10,3 - (4 + 4,8) = 1,5 \text{ m}$$

b. Tekanan di tengah-tengah langkah hisap:

kecepatan air pada pipa hisap:

$$v = \frac{A}{a} \times \omega r \sin \theta = \frac{0,03142}{0,00785} \pi \times 0,15 \times 1 = 1,88 \text{ m/s}$$

Kerugian head karena gesekan:

$$H_f = \frac{4 f l v^2}{2 g d} = \frac{4 \times 0,01 \times 8 \times (1,88)^2}{2 \times 9,81 \times 0,1} = 0,6 \text{ m}$$

head tekanan di tengah-tengah langkah torak:

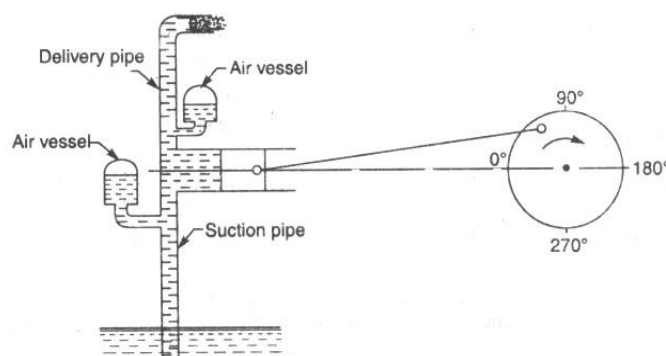
$$H_{torak} = H - (H_s + H_f) = 10,3 - (4 + 0,6) = 5,7 \text{ m}$$

c. Tekanan di akhir langkah hisap:

$$H_{torak} = H - (H_s - H_a) = 10,3 - (4 - 4,83) = 11,1 \text{ m}$$

Bejana Udara

Bejana udara adalah suatu ruangan yang tertutup, terbuat dari besi tuang atau bahan lainnya, mempunyai lubang pada bagian dasarnya, supaya air bisa masuk atau keluar ruang bejana udara. Bejana udara di dalamnya diisi udara. Umumnya pada pompa torak dipasang dua buah bejana udara, masing-masing sebuah pada pipa hisap dan sebuah pada pipa hantar, dan diletakkan sedekat mungkin dengan silinder pompa. (lihat gambar 12).



Gambar 12. Bejana udara dipasang pada pipa hisap dan hantar.

Kegunaan bejana udara pada pompa torak adalah untuk memperoleh suatu aliran yang teratur pada bagian keluar pompa. Bila kita perhatikan gambar 10 di atas, akan terlihat bahwa pada saat awal langkah tekan, torak bergerak dengan suatu percepatan. Ini berarti bahwa air akan didorong ke dalam pipa hantar dengan kecepatan yang melebihi kecepatan rata-rata. Dalam keadaan ini kelebihan air akan mengalir ke dalam bejana udara, dan akan memampatkan udara yang ada di dalam bejana udara tersebut. Selama pertengahan langkah tekan sampai pada akhir langkah tekan, torak akan mengalami suatu perlambatan, yang akan mengakibatkan air mengalir ke dalam pipa hantar dengan kecepatan dibawah kecepatan rata-rata. Air yang berada di dalam bejana akan segera keluar dan mengalir ke dalam pipa hantar, sehingga akan mengatasi kekurangan aliran di dalam pipa hantar. Dengan demikian kapasitas di dalam pipa hantar lebih kurang menjadi uniform (teratur). Demikian juga yang terjadi pada pipa hisap. Dalam prakteknya, kecepatan air dalam pipa hisap maupun dalam pipa hantar dapat dianggap uniform.

Kecepatan Maksimum Poros Engkol Dengan Bejana Udara

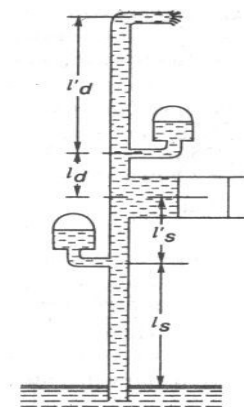
Menurut penjelasan terdahulu, kecepatan air di dalam pipa hisap sampai di bejana udara (untuk pipa sepanjang l_s) adalah uniform. Percepatan dan perlambatan terhadap kecepatan air, akan terjadi di dalam pipa hisap setelah bejana udara (untuk pipa sepanjang l_s). Untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar 13.

Demikian juga akan terjadi percepatan dan perlambatan terhadap kecepatan air di dalam pipa hantar sampai di bejana udara (untuk panjang pipa l_d). Kecepatan air di dalam pipa hantar setelah bejana udara (untuk panjang pipa l_d) adalah konstan.

Untuk menghitung kecepatan maksimum poros engkol, kita harus membatasi head separasi sebagai berikut:

$$H_{sep} = H - (H_s + H_a \text{ untuk } l_s' + H_f \text{ untuk } l_s).$$

Kecepatan konstan air di dalam pipa hisap dan di dalam pipa hantar, dapat diperoleh dengan jalan membagi kapasitas pompa dengan luas penampang pipa.



Gambar 13. bejana udara terpasang pada pipa.

Jika ditentukan:

L = panjang langkah

A = luas penampang torak

N = kecepatan pompa dalam rpm

ω = kecepatan sudut dari poros engkol

a = luas penampang pipa

r = jari-jari engkol

v = kecepatan air dalam pipa

Untuk **pompa aksi tunggal** :

$$Q = \frac{LAN}{60}$$

Kecepatan air : $v = Q/a$

$$= \frac{LAN}{60 \times a}$$

$$= \frac{A}{a} \frac{LN}{60}$$

Sedangkan : $L = 2r$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad \text{atau :} \quad N = \frac{60 \omega}{2\pi}$$

Maka :

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

$$= \frac{A}{a} \times \frac{\omega r}{\pi}$$

Untuk **pompa aksi ganda** :

$$Q = \frac{2LAN}{60}$$

Kecepatan air : $v = Q/a$

$$= \frac{2LAN}{60 \times a}$$

$$= \frac{2A}{a} \frac{LN}{60}$$

$$a = 60$$

Sedangkan : $L = 2 r$

$$\omega = \frac{2.\pi N}{60} \quad \text{atau :} \quad N = \frac{60 \omega}{2.\pi}$$

Maka :

$$\begin{aligned} v &= \frac{2A}{a} \times \frac{2r \frac{60\omega}{2\pi}}{60} \\ &= \frac{2A}{a} \times \frac{\omega r}{\pi} \end{aligned}$$

Contoh soal

Sebuah pompa torak aksi tunggal mempunyai torak dengan diameter 250 mm dan panjang langkah 450 mm. Pipa hisap mempunyai diameter 125 mm dan panjang 12 meter dengan head 3 meter. Sebuah bejana udara dipasang pada pipa hisap pada jarak 1,5 meter dari silinder dan 10,5 meter dari penampungan air yang dihisap.

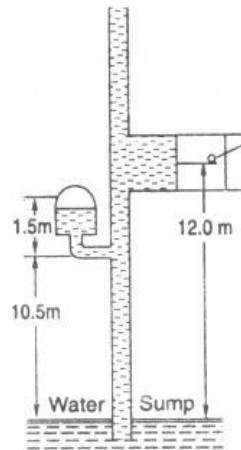
Jika penunjukan barometer 10,0 meter dan separasi terjadi pada 2,5 meter vakum, carilah kecepatan dimana poros engkol beroperasi tanpa terjadi separasi. Ambil $f = 0,01$.

Jawab

Diketahui: $D = 250 \text{ mm} = 0,25 \text{ m}$; $L = 450 \text{ mm} = 0,45 \text{ m}$; jari-jari poros engkol, $r = 0,45/2 = 0,225 \text{ m}$; $d = 125 \text{ mm} = 0,125 \text{ m}$; $l = 12 \text{ m}$; $H_s = 3 \text{ m}$; $l'_s = 1,5 \text{ m}$; $l_s = 10,5 \text{ m}$; $H = 10 \text{ m}$; $H_{sep} = 2,5 \text{ m}$; dan $f = 0,01$.

Karena bejana udara dipasang pada pipa hisap, maka:

1. Terdapat kerugian head karena gesekan pada pipa hisap sepanjang 10,5 meter.
2. Terdapat percepatan head tekanan pada pipa hisap sepanjang 1,5 meter.



Luas penampang torak:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D)^2 = \frac{\pi}{4} (0,25)^2 = 0,0491 \text{ m}^2$$

Luas penampang pipa hisap:

$$a = \frac{\pi}{4} \times (d)^2 = \frac{\pi}{4} (0,125)^2 = 0,0123 \text{ m}^2$$

Kecepatan air pada pipa hisap:

$$v = \frac{A}{a} \times \frac{\omega r}{\pi} = \frac{0,0491}{0,0123} \times \frac{\omega \times 0,225}{\pi} = 0,286 \omega \text{ m/s}$$

Kerugian head karena gesekan:

$$H_f = \frac{4 f l v^2}{2 g d} = \frac{4 \times 0,01 \times 10,5 (0,286 \omega)^2}{2 \times 9,81 \times 0,125} = 0,014 \omega^2$$

percepatan head tekanan pada pipa hisap sepanjang 1,5 meter:

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{l}{g} \times \frac{A}{a} \times \omega^2 r = \frac{1,5}{9,81} \times \frac{0,0491}{0,0123} \times \omega^2 \times 0,225 \\ &= 0,137 \omega^2 \end{aligned}$$

Head separasi:

$$\begin{aligned} 2,5 &= H - (H_s + H_a + H_f) = 10 - (3 + 0,137 \omega^2 + 0,014 \omega^2) \\ &= 7 - 0,151 \omega^2 \end{aligned}$$

$$\omega^2 = \frac{7 - 2,5}{0,151} = 29,8 \quad \text{atau} \quad \omega = 5,46 \text{ rad/s}$$

Kecepatan poros engkol:

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60}$$

$$5,46 = \frac{2\pi N}{60} = 0,105 N$$

$$N = 5,46/0,105 = 52 \text{ rpm}$$

Soal-soal

1. Apa yang dimaksud dengan pompa sentrifugal, dan bagaimana prinsip kerjanya.
2. Sebutkan jenis-jenis rumah pompa untuk impeller pompa sentrifugal.
3. Terangkan fungsi rumah pompa spiral pada pompa sentrifugal.
4. Sebuah pompa sentrifugal mempunyai diameter luar 30 cm dan diameter dalam 15 cm. Sudut sudu sisi masuk adalah 25° dan sisi keluar 30° dan pompa beroperasi pada 1450 rpm. Jika kecepatan aliran konstan, carilah kerja yang dilakukan air.
5. Sebuah pompa sentrifugal mempunyai diameter luar 75 cm dan diameter dalam 40 cm, dan beroperasi pada 1000 rpm. Sudu mempunyai kurva ke belakang sebesar 35° terhadap sisi keluar. Jika kecepatan aliran konstan pada 6 m/s, carilah:
 - a. Sudut sudu sisi masuk.
 - b. Kerja yang dilakukan per kg air.
6. Mengapa pompa torak disebut pompa perpindahan positif?
7. Jelaskan perbedaan antara *koefisien discharge* dan *slip* pompa torak.
8. Sebuah pompa torak aksi tunggal mempunyai plunyer dengan diameter 15 cm dan langkah 22,5 cm. Jika pompa menghantarkan air 115 liter/min pada 30 rpm, carilah:
 - a. Kapasitas pompa teoritis.
 - b. Koefisien discharge.
 - c. Slip pompa.
9. Sebuah pompa torak aksi ganda mempunyai silinder dengan diameter 15 cm dan langkah 30 cm, digunakan untuk menaikkan air dengan total head 30 m. Carilah daya kuda yang diperlukan untuk menggerakkan pompa, jika engkol berputar pada 60 rpm.

BAB 9

KOMPRESOR UDARA

Kompresor udara adalah sebuah mesin yang mengkompresi udara dan menaikkan tekanannya. Kompresor udara menghisap udara dari udara atmosfer, mengkompresinya dan kemudian menghantarkannya pada tekanan tinggi pada sebuah bejana penyimpan.

Klasifikasi Kompresor Udara

1. Berdasarkan kerja.
 - a. Kompresor torak.
 - b. Kompresor rotari/putar.
2. Berdasarkan gerakan.
 - a. Kompresor gerakan tunggal.
 - b. Kompresor gerakan ganda.
3. Berdasarkan jumlah tingkat.
 - a. Kompresor tingkat satu.
 - b. Kompresor tingkat banyak/jamak.

Istilah-istilah

1. Tekanan masuk.

Adalah tekanan mutlak kompresor udara pada sisi masuk kompresor.
2. Tekanan hantar/buang.

Adalah tekanan mutlak udara pada sisi keluar kompresor.
3. Rasio kompresi (atau rasio tekanan).

Adalah rasio tekanan hantar terhadap tekanan sisi masuk.
4. Kapasitas kompresor.

Adalah volume udara yang dihasilkan oleh kompresor dan dinyatakan dalam m^3/min atau m^3/s .
5. Free air delivery (Hantaran udara bebas).

Adalah volume aktual yang dihasilkan kompresor jika diukur pada kondisi temperatur dan tekanan normal.

6. Volume sapuan.

Adalah volume udara yang dihisap oleh kompresor selama langkah hisap.

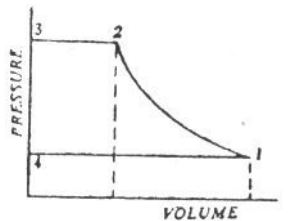
7. Tekanan efektif rata-rata.

Selama langkah torak, tekanan udara selalu berubah-ubah. Tekanan efektif rata-rata dicari dengan cara matematik yaitu membagi kerja per siklus dengan volume langkah.

A. KOMPRESOR TORAK

Single Stage Compressor tanpa Clearance

Operasi kompresor ini dapat dilihat pada gambar 1. Kompresi akan mengikuti kurva 1-2. Kerja yang dilakukan per siklus adalah = W



Gambar 9.1. Kurva p-v

a. Jika kompresi mengikuti hukum $PV^n = \text{konstan}$,

$$\begin{aligned}
 W &= p_2 v_2 + \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{n-1} - p_1 v_1 \\
 &= \frac{n}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{n}{n-1} mR (T_2 - T_1) \\
 &= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]
 \end{aligned}$$

atau
$$W = \frac{n}{n-1} mR (T_2 - T_1)$$

b. Jika kompresi adalah adiabatik:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{\gamma}{\gamma-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\
 &= \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \\
 &= \frac{\gamma}{\gamma-1} m R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{atau } W &= \frac{\gamma}{\gamma-1} m R (T_2 - T_1) \\
 &= m \cdot C_p (T_2 - T_1)
 \end{aligned}$$

c. Jika kompresi adalah isotermal:

$$\begin{aligned}
 W &= p_1 v_1 \ln \frac{v_1}{v_2} \\
 &= p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}
 \end{aligned}$$

$$\text{atau } W = m R T_1 \ln \frac{v_1}{v_2}$$

Contoh soal

Kompresor udara jenis torak satu tingkat digunakan untuk mengkompresi 60 meter kubik udara dari 1 bar ke 8 bar pada 22⁰ C. Carilah kerja yang dilakukan, jika kompresi pada udara adalah: (I) isotermal, (ii) adiabatik dengan indeks adiabatik 1,4 dan (iii) politropik dengan indeks politropik 1,25.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 60 \text{ m}^3$; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $p_2 = 8 \text{ bar} = 8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; temperatur udara = 22⁰ C; $\gamma = 1,4$; $n = 1,25$;

(i) kompresi isotermal

$$W = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$= 1 \times 10^5 \times 60 \times \ln\left(\frac{8}{1}\right) = 12,5 \times 10^6 \text{ Nm}$$

(ii) *kompresi adiabatik*

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,4}{1,4 - 1} \times 1 \times 10^5 \times 60 \left[8^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1 \right]$$

$$= 17 \times 10^6 \text{ Nm}$$

(iii) *kompresi politropik*

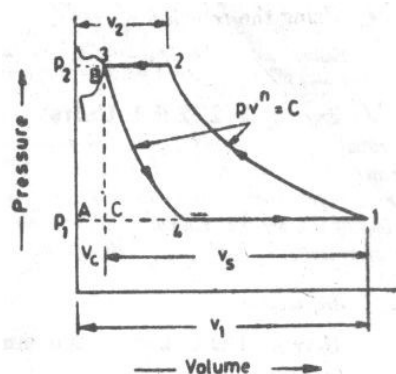
$$W = \frac{n}{n - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,25}{1,25 - 1} \times 1 \times 10^5 \times 60 \left[8^{\frac{1,25 - 1}{1,25}} - 1 \right]$$

$$= 15,1 \times 10^6 \text{ Nm}$$

Single Stage Compressor dengan Clearance

Kerja yang dilakukan per siklus apabila hukum kompresi dan ekspansi mengikuti:



Gambar 9.2. Diagram p - v dengan clearance.

$$W = \text{Luas daerah 1-2-3-4}$$

$$= (\text{luas daerah A-1-2-B}) - (\text{luas daerah A-4-3-B})$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{n}{n-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] - \frac{n}{n-1} \times p_1 v_4 \left[\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\
&= \frac{n}{n-1} p_1 (v_1 - v_4) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\
&= \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]
\end{aligned}$$

Contoh soal

kompresor udara torak aksi tunggal satu tingkat mempunyai diameter silinder 200 mm dan langkah 300 mm. Kompresor menerima udara pada 1 bar dan 20⁰ C dan mengeluarkan udara pada 5,5 bar. Jika kompresi mengikuti persamaan $p v^{1,3} = C$ dan volume clearance 5 persen dari volume langkah, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika kompresor beroperasi pada 500 rpm.

Jawab

Diketahui: diameter silinder = 200 mm = 0,2 m ; panjang langkah = 300 mm = 0,3 m ; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 20^0 \text{ C} = 293^0 \text{ K}$; $p_2 = 5,5 \text{ bar} = 5,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $n = 1,3$; $N = 500 \text{ rpm}$;

$$\text{Volume langkah} = \frac{\pi}{4} \times 0,2^2 \times 0,3 = 0,00942 \text{ m}^3$$

$$v_c = 5\% \times \text{volume langkah}$$

$$= 0,05 \times 0,00942 = 0,00047 \text{ m}^3$$

$$\text{volume awal : } v_1 = 0,00942 + 0,00047 = 0,00989 \text{ m}^3$$

maka:

$$v_4 = v_c \times \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,00047 \times \left(\frac{5,5}{1} \right)^{\frac{1}{1,3}}$$

$$= 0,00174 \text{ m}^3$$

volume sapuan :

$$(v_1 - v_4) = 0,00989 - 0,00174 = 0,00815 \text{ m}^3$$

dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{n}{n-1} p_1 (v_1 - v_4) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\
 &= \frac{1,3}{1,3-1} \times 1 \times 10^5 \times 0,00815 \left[\left(\frac{5,5}{1} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right] \\
 &= 1.702 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor:

$$\begin{aligned}
 P &= W \times N = 1.702 \times \frac{500}{60} = 14.190 \text{ W} \\
 &= 14,19 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Indicated Horse Power

Bila N menyatakan kecepatan poros engkol, maka jumlah langkah kerja (N_w) adalah:

$N_w = N$ untuk kompresor aksi tunggal

$N_w = 2N$ untuk kompresor aksi ganda

$$\text{IHP} = \frac{W \times \text{jumlah langkah kerja}}{4500}$$

Bila W diambil dari persamaan b , maka disebut *adiabatic h.p.* dan jika W diambil dari persamaan c , maka dinamakan *isothermal h.p.*

Indicated horse power (IHP) biasa juga dikenal sebagai *air horse power* (AHP).

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor disebut *shaft horse power* (SHP) atau *brake horse power* (BHP). Jadi dalam suatu kompresor BHP selalu lebih besar daripada IHP.

Efisiensi Kompresor

$$\text{Efisiensi mekanik} = \frac{\text{indicated HP}}{\text{Brake HP}}$$

$$\text{Efisiensi isothermal} = \frac{\text{isothermal work done}}{\text{Indicated work done}}$$

Ini biasa juga disebut sebagai *indicated isothermal efficiency*, *compressor efficiency* atau *compression efficiency*.

$$\text{Efisiensi isothermal keseluruhan} = \frac{\text{isothermal HP}}{\text{Shaft HP}}$$

$$\text{Efisiensi adiabatik keseluruhan} = \frac{\text{adiabatik HP}}{\text{Shaft HP}}$$

$$\text{Efisiensi Volumetrik} = \frac{\text{volume of free air delivered}}{\text{Volume sapuan torak}}$$

Free air delivered (FAD) dipergunakan untuk menyatakan volume udara pada tekanan dan temperatur masuk ke dalam kompresor.

Contoh soal

Kompresor udara torak aksi tunggal mempunyai diameter silinder 200 mm dan langkah 300 mm. Kompresor menghisap udara pada 1 kg/cm² dan 27⁰ C dan melepaskan udara pada 8 kg/cm² pada kecepatan 100 rpm. Carilah (i) daya IHP kompresor, (ii) massa udara yang dilepaskan kompresor per menit, (iii) temperatur udara yang keluar dari kompresor. Kompresi mengikuti persamaan $pv^{1,25} = C$. Ambil harga $R = 29,3 \text{ m/kg}^0\text{K}$.

Jawab

Diketahui: diameter silinder = 200 mm = 0,2 m ; panjang langkah = 300 mm = 0,3 m ; $p_1 = 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_1 = 27^0 \text{ C} = 300^0 \text{ K}$; $p_2 = 8 \text{ kg/cm}^2 = 8 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,25$; $N = 100 \text{ rpm}$; $R = 29,3 \text{ kg m/kg}^0\text{K}$.

$$\text{Volume langkah} = \frac{\pi}{4} \times 0,2^2 \times 0,3 = 0,00942 \text{ m}^3$$

Karena kompresor adalah jenis aksi tunggal maka jumlah langkah:

$$N_w = N = 100$$

(i) *Daya kuda indikated dari kompresor*

Dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ &= \frac{1,25}{1,25-1} \times 1 \times 10^4 \times 0,00942 \left[\left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} - 1 \right] \\ &= 242,5 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

$$\therefore IHP = \frac{W \times N}{4500} = \frac{242,5 \times 100}{4500} = 5,39 \text{ hp}$$

(ii) *massa udara yang dikeluarkan kompresor per menit:*

$$p_1 v_1 = mRT_1$$

$$1 \times 10^4 \times 0,0094 = m \times 29,3 \times 300$$

$$m = 0,0107 \text{ kg per langkah.}$$

\therefore massa yang dikeluarkan per menit:

$$= m \times N_w = 0,0107 \times 100 = 0,107 \text{ kg}$$

(iii) *Temperatur udara yang keluar dari kompresor:*

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{T_2}{300} = \left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 8^{0,2} = 1,516$$

$$T_2 = 1,516 \times 300 = 454,8 \text{ } ^\circ\text{K} = 181,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kompresor Bertingkat Banyak

Dalam suatu kompresor bertingkat banyak, udara mula-mula masuk ke dalam silinder tekanan rendah/low pressure cylinder (LP cylinder) untuk dimampatkan. Kemudian udara tadi masuk ke dalam silinder bertekanan menengah/intermediate pressure cylinder untuk dimampatkan lagi. Akhirnya udara tersebut dikompresikan lagi ke dalam silinder bertekanan tinggi/high pressure cylinder (HP cylinder) untuk di delivery.

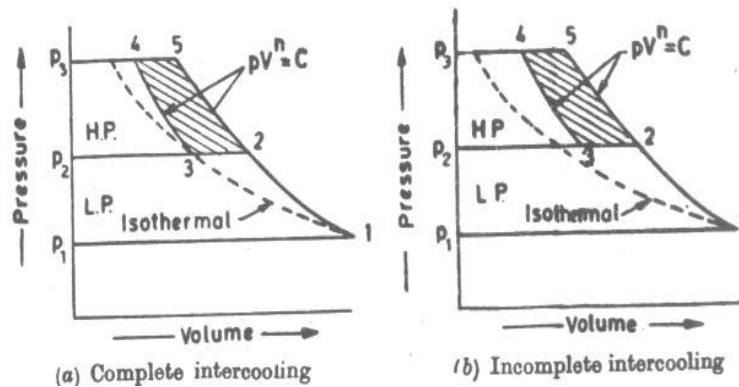
Dengan mengabaikan *clearance* dan kemudian menggunakan hukum untuk kompresi :

$$pv^n = \text{konstan}$$

Kita dapat memperoleh suatu diagram p - v untuk suatu kompresor dua tingkat seperti gambar 9.3.

Pendinginan antara sempurna atau *complete intercooling* adalah ketika udara yang meninggalkan *intercooler* (T_3) adalah sama dengan temperatur udara atmosfer awal (T_1). Dalam hal ini, titik 3 terletak pada kurva isothermal seperti yang ditunjukkan gambar 9.3a.

Pendinginan antara tidak sempurna adalah jika udara yang meninggalkan intercooler (T_3) lebih tinggi dari temperatur udara atmosfer awal. Dalam hal ini, titik 3 terletak pada sisi kanan kurva isothermal seperti yang ditunjukkan gambar 9.3b



Gambar 9.3. Pendinginan antara udara.

Kerja kompresor dua tingkat:

a. Pada pendinginan antara tidak sempurna:

$$W = \frac{n}{n-1} \left[p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} + p_2 v_2 \left\{ \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \right]$$

b. Pada pendinginan sempurna:

$$W = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$

$$W = \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$

Untuk mengurangi kerja, udara didinginkan setelah dikompresi oleh kompresor. Jika p_2 adalah tekanan menengah, maka:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} \quad \text{atau} \quad P_2 = \sqrt{P_1 \cdot P_3}$$

Untuk tiga tingkat :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} = \frac{P_3}{P_4}$$

Jadi untuk x tingkat berlaku:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} = \dots = \frac{P_x}{P_{x+1}}$$

Untuk satu tingkat:

$$W = \frac{1n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{1n}} - 1 \right]$$

Kerja minimum dengan *intercooling*:

Untuk dua tingkat:

$$W = \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right]$$

Untuk tiga tingkat:

$$W = \frac{3n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{3n}} - 1 \right]$$

Untuk x tingkat:

$$W = \frac{xn}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_{x+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{xn}} - 1 \right]$$

Efisiensi volumetrik keseluruhan :

$$= \frac{\text{volume udara yang dibuang pada tekanan dan suhu masuk}}{\text{Volume langkah silinder tekanan rendah}}$$

$$\text{Efisiensi volumetrik absolut} = \frac{\text{Volume udara yang dibuang pada NTP}}{\text{Volume langkah silinder tekanan rendah}}$$

Catatan : NTP adalah singkatan dari Normal Temperatur and Pressure.

Contoh soal

Perkirakanlah kerja yang diperlukan oleh kompresor udara aksi tunggal dua tingkat yang mengkompresi 2,8 m³ udara per menit pada 1,05 kg/cm² abs dan 10⁰ C hingga tekanan 35 kg/cm² abs. Receiver antara mendinginkan udara ke 30⁰ C dan tekanan 5,6 kg/cm². Ambil n udara 1,4.

Jawab

Diketahui: $v_1 = 2,8 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,05 \text{ kg/cm}^2 = 1,05 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_1 = 10^0 \text{ C} = 283^0 \text{ K}$; $p_3 = 35 \text{ kg/cm}^2 = 35 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_2 = 30^0 \text{ C} = 303^0 \text{ K}$; $p_2 = 5,6 \text{ kg/cm}^2 = 5,6 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,4$

$$\text{dari: } \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_3}$$

$$v_2 = \frac{p_1 v_1 \times T_3}{p_2 \times T_1} = \frac{1,05 \times 10^4 \times 2,8 \times 303}{5,6 \times 10^4 \times 283}$$

$$= 0,562 \text{ m}^3$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$W = \frac{n}{n-1} \left[p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} + p_2 v_2 \left\{ \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \right]$$

$$W = \frac{1,4}{1,4-1} \left[1,05 \times 10^4 \times 2,8 \left\{ \left(\frac{5,6}{1,05} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right\} + 5,6 \times 10^4 \times 0,562 \left\{ \left(\frac{35}{5,6} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right\} \right]$$

$$= 13.915 \text{ kg-m/min}$$

B. KOMPRESOR ROTARI**Perbandingan Kompresor Torak dengan Rotari**

Berikut ini perbandingan utama antara kompresor udara jenis torak dan rotari:

No.	Kompresor Torak	Kompresor Rotari
1.	Tekanan buang maksimum dapat mencapai 1.000 kg/cm ²	Tekanan buang maksimum hanya 10 kg/cm ²
2.	Kapasitas udara maksimum yang di kompresi sekitar 300 m ³ /min	Kapasitas udara maksimum dapat mencapai 3000 m ³ /min
3.	Cocok untuk kapasitas udara rendah dan tekanan tinggi.	Cocok untuk kapasitas besar pada tekanan rendah.
4.	Kecepatan kompresor rendah.	Kecepatan kompresor tinggi.
5.	Suplai udara terputus-putus.	Suplai udara kontinyu.
6.	Ukuran kompresor besar untuk kapasitas tertentu.	Ukuran kompresor kecil untuk kapasitas yang sama.
7.	<i>Balancing</i> merupakan masalah utama.	Tidak ada permasalahan <i>balancing</i> .
8.	Sistem pelumasan rumit.	Sistem pelumasan sederhana.
9.	Udara yang dilepaskan kurang bersih, karena kontak dengan minyak pelumas.	Udara yang dilepaskan lebih bersih, karena tidak kontak dengan minyak pelumas.
10.	Efisiensi isothermal digunakan untuk semua jenis perhitungan.	Efisiensi isentropik digunakan untuk semua jenis perhitungan.

Jenis-jenis Kompresor Rotari

Ada berbagai jenis kompresor rotari, berikut ini jenis-jenis yang sering digunakan:

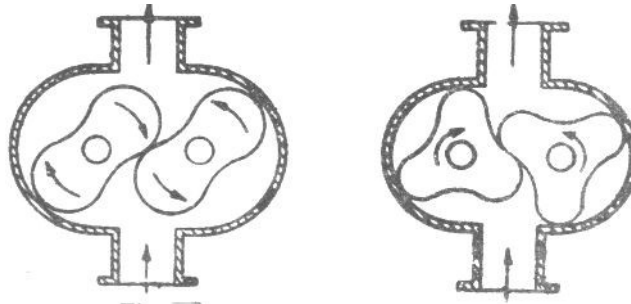
1. *Root blower compressor*.
2. *Vane blower compressor*.
3. Kompresor blower sentrifugal.
4. Kompresor aliran aksial.

Dua jenis pertama dikenal sebagai “kompresor perpindahan positif” (positive displacement compressors), sedangkan dua lainnya dikenal dengan 'kompresor perpindahan non-positif'.

Root Blower Compressor

Sebuah kompresor blower *root* (root blower compressor), dalam bentuk yang paling sederhana, terdiri dari dua rotor dengan *lobe* (sudu) yang berputar dan mempunyai saluran masuk dan buang. Cara kerja kompresor ini mirip dengan cara kerja pompa roda gigi. Terdapat berbagai desain dari roda, namun umumnya kompresor mempunyai dua

atau tiga lobe. Namun prinsip kerjanya sama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.4 (a) dan (b). Lobe di desain sedemikian sehingga kedap udara (rapat) pada titik singgung dengan rumahnya.



Gambar 9.4 Root blower compresor.

Ketika rotor berputar, udara pada tekanan atmosfer terperangkap pada ruang yang terbentuk antara lobe dan rumahnya. Gerakan berputar dari lobe akan membuang udara yang terperangkap ke *receiver* (penampung udara). Sehingga makin banyak udara yang masuk ke *receiver* maka makin naik tekanannya, yang pada akhirnya tekanan tinggi akan dihasilkan oleh *receiver*.

Menarik untuk diketahui bahwa ketika lobe berputar dan saluran keluar terbuka, udara (bertekanan tinggi) dari *receiver* mengalir kembali ke ruang kompresor dan tercampur dengan udara yang terperangkap. Aliran balik berlanjut sampai tekanan di ruang lobe sama dengan tekanan di *receiver*.

Kerja teoritis untuk mengkompresi udara adalah:

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \dots (i)$$

dimana: p_1 = tekanan udara masuk

p_2 = tekanan udara keluar

γ = indkes adiabtik udara

v_1 = volume udara yang di kompresi

dan kerja sebenarnya:

$$= v_1 (p_2 - p_1) \quad \dots (ii)$$

∴ efisiensi blower root:

$$\eta = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{v_1 (p_2 - p_1)}$$

$$= \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{\left[r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{(\gamma-1)}$$

dimana r adalah rasio tekanan (p_2 / p_1). Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor dapat dihitung dari kerja yang dilakukan.

- Catatan:**
1. Kadang-kadang udara dengan tekanan tinggi diperoleh dengan menempatkan dua atau lebih blower root dalam susunan seri, dan dengan menggunakan pendingin antara diantara masing-masing tingkat.
 2. Udara dibuang empat kali dalam satu putaran jika rotornya terdiri dari dua lobe. Dengan cara yang sama, udara dibuang enam kali dalam satu putaran jika rotornya terdiri dari 3 lobe.

Contoh soal

Kompresor jenis *root blower* mengkompresi $0,05 \text{ m}^3$ udara dari $1,0 \text{ kg/cm}^2$ ke $1,5 \text{ kg/cm}^2$ per putaran. Carilah efisiensi kompresor.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 0,05 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,0 \text{ kg/cm}^2 = 1,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $p_2 = 1,5 \text{ kg/cm}^2 = 1,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$

Kerja per putaran:

$$W_1 = v_1 (p_2 - p_1) = 0,05 (1,5 \times 10^4 - 1,0 \times 10^4)$$

$$= 250 \text{ kg-m}$$

kerja ideal per putaran:

$$W_2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,4}{1,4-1} \times 1,0 \times 10^4 \times 0,05 \left[\left(\frac{1,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right]$$

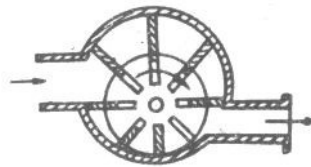
$$= 215 \text{ kg-m}$$

∴ efisiensi kompresor:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{215}{250} = 0,86 = 86 \%$$

Kompresor Vane Blower

Kompresor *Vane Blower* adalah bentuk paling sederhana kompresor rotari dimana dimana terdiri dari sebuah piringan berputar secara eksentrik di dalam sebuah rumah kompresor kedap udara dengan saluran masuk dan keluar. Piringan mempunyai beberapa slot (umumnya 4 sampai 8) yang mempunyai *vane*. Ketika rotor memutar piring, vane tertekan ke arah rumah kompresor karena gaya sentrifugal, membentuk kantong udara.



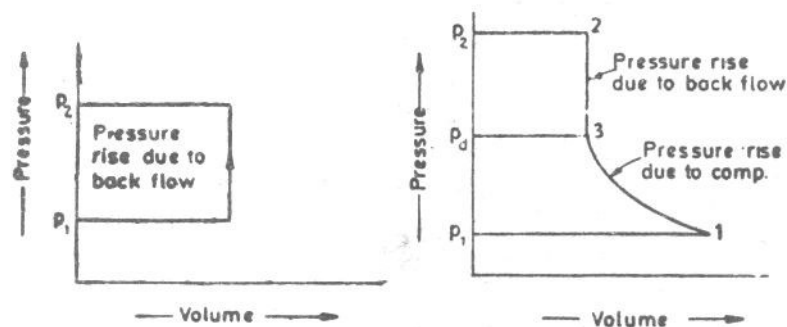
Gambar 9.5. Kompresor vane blower.

Energi mekanik diberikan ke piringan oleh sumber dari luar. Ketika piring berputar, udara terperangkap di dalam kantong yang terbentuk antara vane dan rumah kompresor. Pertama-tama, gerak putar vane mengkompresi udara, ketika vane yang berputar membuka saluran masuk, sejumlah udara (di bawah tekanan tinggi) mengalir kembali ke dalam kantong dengan cara yang sama dengan kompresor *root blower*. Sehingga tekanan udara, yang terperangkap di dalam kantong, pertama-tama meningkat karena volume yang berkurang dan kemudian dengan aliran balik udara, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9.5. Kemudian udara dilepaskan ke *receiver* oleh rotasi vane. Terakhir, udara tekanan tinggi dilepaskan oleh *receiver*.

Aliran Balik Pada Kompresor Udara Perpindahan Positif

Pada kompresor blower jenis *root* atau jenis *vane*, ketika *lobe* atau *vane* berputar dan membuka saluran keluar, sebagian udara tekanan tinggi dari *receiver* mengalir balik ke ruang/kantong antara *lobe* dengan rumah kompresor atau *vane* dengan rumah kompresor. Udara balik dari *receiver* ini bercampur dengan udara terperangkap dari sisi hisap sampai

tekanan di kantong sama dengan tekanan di *receiver*. Karena itu tekanan udara yang dilepaskan ke *receiver* dari kantong udara adalah sama dengan tekanan udara di *receiver*. Proses aliran balik udara adalah proses *irreversible* dan disebut kompresi ireversibel.



Gambar 9.6. Diagram $p - v$ kompresor udara.

Perlu dicatat bahwa kenaikan tekanan pada kompresor blower *root* semata-mata disebabkan oleh aliran balik, dan proses ini dijelaskan pada gambar 9.6 (a).

Kenaikan tekanan pada kompresor blower *vane* terjadi pertama-tama karena kompresi dan kemudian karena aliran balik, seperti ditunjukkan oleh gambar 9.6 (b). Kompresor blower *root* hanya ada di dunia akademik saja, namun kompresor blower *vane* telah digunakan, tetapi tidak terlalu sukses.

Misalkan sebuah kompresor blower *vane* mengkompresi udara seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9.6 (b).

- Misal
- p_1 = tekanan masuk udara
 - p_2 = tekanan keluar udara
 - p_d = tekanan pada titik 3
 - γ = indeks adiabatik udara
 - v_1 = volume udara yang dikompresi

Kerja yang dilakukan karena kompresi (1-3):

$$W_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_d}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \dots \text{(I)}$$

dan kerja karena aliran balik (3-2):

$$W_2 = v_2 (p_2 - p_d) \quad \dots \text{(ii)}$$

∴ kerja total yang dilakukan

$$W = W_1 + W_2$$

∴ Efisiensi *blower vane* :

$$\eta = \frac{W_2}{W_1 + W_2}$$

Catatan: harga v_2 dan p_d pada persamaan (ii) dapat dicari dari persamaan:

$$v_2 = v_1 \times \left(\frac{p_1}{p_d} \right)^{1/\gamma}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor rotari jenis *vane* mengkompresi 4,5 m³ udara per menit dari 1,0 kg/cm² hingga 2,0 kg/cm² jika berputar pada 450 rpm. Carilah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor jika: (i) saluran masuk dan buang diletakkan sedemikian sehingga tidak terjadi kompresi internal, (ii) saluran masuk dan buang diletakkan sedemikian sehingga tekanan naik 50% karena kompresi sebelum terjadi aliran balik.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 4,5 \text{ m}^3/\text{min}$; $p_1 = 1,0 \text{ kg/cm}^2 = 1,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $p_2 = 2,0 \text{ kg/cm}^2 = 2,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; kecepatan = 450 rpm

(i) *Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika tidak ada kompresi internal*

Kerja tanpa kompresi internal:

$$W = v_1 (p_2 - p_1) = 4,5 (2,0 \times 10^4 - 1,0 \times 10^4)$$

$$= 45.000 \text{ kgm/min}$$

$$\therefore \text{Daya, } P = \frac{45.000}{4.500} = 10,0 \text{ hp}$$

(ii) Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika 50% kenaikan tekanan karena kompresi.

Karena terdapat 50% kenaikan tekanan karena kompresi, maka pelepasan udara sebelum aliran balik:

$$\begin{aligned} p_d &= 1,0 + 0,5 (2,0 - 1,0) \\ &= 1,5 \text{ kg/cm}^2 = 1,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\therefore v_2 = v_1 \times \left(\frac{p}{p_d} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = 4,5 \left(\frac{1,0}{1,5} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 3,37$$

Kita tahu bahwa kerja teoritis pada proses kompresi udara dari 1,0 kg/cm² ke 1,5 kg/cm²:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{\gamma}{\gamma-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_d}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \\ &= \frac{1,4}{1,4-1} \times 1,0 \times 10^4 \times 4,5 \left[\left(\frac{1,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] \\ &= 19.350 \text{ kgm/min} \end{aligned}$$

dan kerja yang dilakukan pada aliran balik:

$$\begin{aligned} W_2 &= v_2 (p_2 - p_d) = 3,37 (2,0 \times 10^4 - 1,5 \times 10^4) \\ &= 16.850 \text{ kgm/min} \end{aligned}$$

\therefore Kerja total:

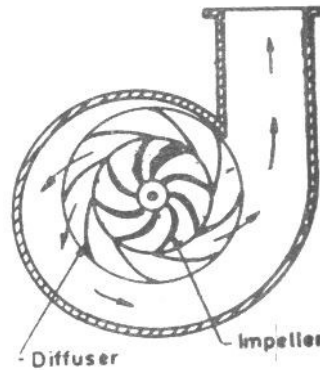
$$W = W_1 + W_2 = 19.350 + 16.850 = 36.200 \text{ kgm/min}$$

dan daya,
$$P = \frac{36.200}{4.500} = 8.04 \text{ hp}$$

Kompresor Sentrifugal

Kompresor blower sentrifugal adalah bentuk sederhana dari kompresor sentrifugal, dimana terdiri dari sebuah rotor (impeller) dengan sejumlah sudu (vane) lengkung terpasang secara simetris. Rotor berputar di dalam rumah siput kedap udara dengan

saluran masuk dan keluar udara. *Casing* (rumah kompresor) di desain sehingga energi kinetik udara dirobah ke energi tekanan sebelum meninggalkan *casing* seperti ditunjukkan oleh gambar 9.7.



Gambar 9.7. Kompresor sentrifugal

Energi mekanik diberikan ke rotor dari sumber eksternal. Ketika rotor berputar, kompresor menghisap udara melalui matanya, meningkat tekanannya karena gaya sentrifugal dan mendorong udara mengalir melalui difuser. Tekanan udara terus meningkat ketika melalui difuser. Akhirnya udara bertekanan tinggi di buang ke *receiver*. Udara masuk ke impeller secara radial dan meninggalkan impeller secara aksial.

Kerja Pada Kompresor Sentrifugal

Persamaan untuk kerja atau daya yang diperlukan bagi kompresor udara torak dapat digunakan untuk kerja dan daya pada kompresor rotari.

Kerja kompresor rotari:

$$W = p_1 v_1 \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad \text{untuk kompresi isothermal}$$

$$= m R T_1 \ln r \quad \text{dimana } r = v_1 / v_2$$

$$= \frac{n}{(n-1)} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \text{untuk kompresi politropik}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{n}{(n-1)} \times RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] && \text{karena } pv = mRT \\
 &= \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] && \text{untuk kompresi adiabatik} \\
 &= m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) && \text{dalam satuan kalor} \\
 &= mJ \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) && \text{dalam satuan kerja}
 \end{aligned}$$

dimana: p_1 = tekanan awal udara

v_1 = volume awal udara

T_1 = temperatur awal udara

p_2, v_2, T_2 = variabel yang sama untuk keadaan akhir

m = massa udara yang dikompresi per menit

n = indeks politropik

γ = indeks adiabatik

C_p = kalor spesifik pada tekanan konstan

J = ekivalen kalor kalor

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal mengeluarkan 50 kg udara per menit pada tekanan 2 kg/cm² dan 97^o C. Tekanan dan temperatur udara masuk masing-masing adalah 1 kg/cm² dan 15^o C. Jika tidak ada kalor yang dilepaskan ke lingkungannya, carilah (a) indeks kompresi, (b) daya yang diperlukan, jika kompresi isothermal. Ambil harga $R = 29,3$ kgm/kg^oK.

Jawab

Diketahui: $p_2 = 2$ kg/cm²; $m = 50$ kg/cm²; $T_2 = 97^{\circ} \text{C} = 97^{\circ} + 273 = 370^{\circ} \text{K}$; $p_1 = 1$ kg/cm²; $T_1 = 15^{\circ} \text{C} = 15^{\circ} + 273 = 288^{\circ} \text{K}$; $R = 29,3$ kgm/K^oK

(a) *Indeks kompresi*

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{370}{288} = \left(\frac{2}{1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = (2)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$1,285 = (2)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\log 1,285 = \frac{n-1}{n} \times \log 2$$

$$0,1089 = \frac{n-1}{n} \times 0,3010$$

$$0,1089 n = 0,3010 n - 0,3010$$

$$0,1921 n = 0,3010$$

$$n = 1,57$$

(b) Daya yang diperlukan jika kompresi isotermal

Kerja kompresor:

$$\begin{aligned} W &= mRT \ln r \\ &= 50 \times 29,3 \times 288 \ln 2 \\ &= 292.100 \text{ kgm/min} \end{aligned}$$

∴ daya yang diperlukan:

$$P = \frac{292.100}{4.500} = 64,9 \text{ hp}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor udara sentrifugal mempunyai rasio kompresi tekanan 5 mengkompresi udara dengan laju 10 kg/s. Jika tekanan dan temperatur awal udara adalah 1 bar dan 20⁰ C, carilah (a) temperatur akhir gas, (b) daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Ambil harga $\gamma = 1,4$ dan $C_p = 1,0$ kJ/kg.K.

Jawab

Diketahui: Rasio kompresi tekanan:

$$\frac{p_2}{p_1} = 5$$

$m = 10 \text{ kg/sec}$; $p_1 = 1 \text{ bar}$; $T_1 = 20^\circ \text{ C} = 20^\circ + 273 = 293^\circ \text{ K}$; $\gamma = 1,4$; $C_p = 1,0 \text{ kJ/kgK}$

(a) *Temperatur akhir gas*

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_2}{293} = (5)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,584$$

$$\therefore T_2 = 293 \times 1,584 = 464^\circ \text{ K} = 191^\circ \text{ C}$$

(b) *Daya yang diperlukan kompresor*

$$P = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

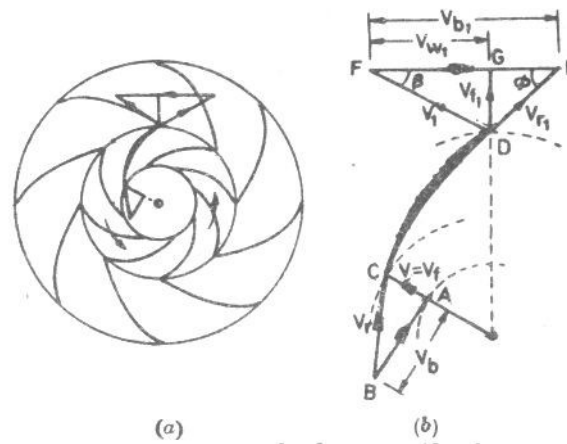
$$= 10 \times 1,0 (464 - 293) = 1.710 \text{ kW}$$

Segitiga Kecepatan Pada Sudu Bergerak Kompresor Sentrifugal

Seperti kita ketahui bahwa udara memasuki kompresor sentrifugal secara radial dan meninggalkan kompresor secara aksial. Lebih jauh, sudu dan difuser didesain sedemikian sehingga udara memasuki dan meninggalkan kompresor secara tangensial untuk mengurangi efek kejutan di sisi masuk dan keluar.

Misalkan udara memasuki sudu pada *C* dan keluar pada *D* seperti ditunjukkan oleh gambar 9.8 (a) dan (b).

Kemudian kita gambar segitiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar sudu seperti yang ditunjukkan oleh gambar 98 (a) dan (b).



Gambar 9.8. Segitiga kecepatan kompresor sentrifugal.

Misalkan: V_b = kecepatan linier sudu bergerak pada sisi masuk (BA)

V = kecepatan absolut udara memasuki sudu (AC)

V_r = kecepatan relatif udara terhadap sudu bergerak pada sisi masuk (BC).

Merupakan perbedaan vektor antara V_b dan V .

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

θ = sudut antara kecepatan relatif (V_r) dengan arah gerak sudu

$V_{b1}, V_1, V_{r1}, V_{f1}, \phi$ = variabel yang bersesuaian untuk sisi keluar

Udara memasuki sudu sepanjang AC dengan kecepatan V . Karena udara memasuki sudu secara tegak lurus (secara radial) terhadap arah gerak sudu maka kecepatan aliran (V_f) sama dengan kecepatan udara (V). Selanjutnya, kecepatan pusar (*whirl*) pada sisi masuk menjadi nol. Kecepatan linier atau kecepatan rata-rata sudu (V_b) digambarkan oleh BA arah dan besarnya. Panjang BC mewakili kecepatan relatif (V_r) udara terhadap sudu. Udara mengalir di permukaan sudu dengan kecepatan relatif (V_{r1}) yang ditunjukkan oleh garis DE .

Kecepatan absolut udara (V_1) ketika meninggalkan sudu ditunjukkan oleh DF membentuk sudut β dengan arah gerak sudu. Komponen tangensial V_1 (diwakili oleh FG) disebut kecepatan pusar pada sisi keluar (V_{w1}). Komponen aksial V_1 (diwakili oleh DG) disebut kecepatan aliran sisi keluar (V_{f1}).

Misalkan w = berat udara yang dikompresi oleh kompresor, kg/s

Sesuai dengan hukum Newton kedua, gaya pada arah gerak sudu:

$$F = \text{massa aliran udara/sec} \times \text{perubahan kecepatan pusar}$$

$$= \frac{w}{g} \times V_w + V_{w1} = \frac{w \cdot V_{w1}}{g} \quad \dots (\because V_w = 0)$$

dan kerja yang dilakukan pada arah gerak sudu:

$$\begin{aligned} W &= \text{gaya} \times \text{jarak} \\ &= \frac{w \cdot V_{w1}}{g} \times V_{b1} \quad \text{kgm/sec} \end{aligned}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor dapat dicari seperti biasanya, dengan persamaan:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\text{kerja yang dilakukan dalam kgm/sec}}{75} \\ &= \frac{w \cdot V_{w1} \times V_{b1}}{g \times 75} \quad \text{hp} \end{aligned}$$

Catatan :

1. Dalam satuan SI, rumus untuk daya adalah:

$$P = w \cdot V_{w1} \times V_{b1} \quad \text{Watt}$$

2. Kecepatan sudu pada sisi masuk dan sisi keluar dapat diperoleh dengan rumus:

$$V_b = \frac{\pi D N}{60} \quad \text{dan} \quad V_{b1} = \frac{\pi D_1 N}{60}$$

dimana D dan D_1 adalah diameter dalam dan diameter luar impeller.

3. Pada kondisi ideal (dengan kata lain untuk kerja maksimum) $V_{w1} = V_{b1}$, maka kerja ideal:

$$= \frac{w}{g} \times V_{w1}^2 = \frac{w}{g} \times V_{b1}^2 \quad \text{kgm/sec}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal berjalan pada kecepatan 2000 rpm dan menerima udara pada 17°C . Jika diameter luar ujung sudu adalah 75 cm, carilah temperatur udara meninggalkan kompresor. Ambil harga $C_p = 0,24$.

Jawab

Diketahui: $N = 2000 \text{ rpm}$; $T_1 = 17^\circ \text{C} = 17 + 273 = 290^\circ \text{K}$; $D_1 = 75 \text{ cm} = 0,75 \text{ m}$; $C_p = 0,24$

Temperatur udara meninggalkan kompresor

Kecepatan tangensial pada ujung sudu:

$$V_b = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi \times 0,75 \times 2000}{60} = 78,5 \quad \text{m/s}$$

∴ kerja per kg udara:

$$W = \frac{1}{g} \times V_{b1}^2 = \frac{1}{9,81} \times 78,5^2 = 628,2 \quad \text{kgm/s}$$

$$= \frac{628,2}{427} = 1,47 \quad \text{kcal/s}$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$W = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$1,47 = 1 \times 0,24 (T_2 - 290) = 0,24 T_2 - 69,6$$

$$T_2 = 296,1^0 \text{ K} = 23,1^0 \text{ C}$$

Lebar Sudu

Lebar sudu impeller pada sisi masuk dan keluar kompresor udara rotari diperoleh dari keadaan dimana massa udara yang mengalir melalui sudu pada sisi masuk dan keluar adalah sama.

Misalkan: b = lebar sudu impeller pada sisi masuk

D = diameter impeller pada sisi masuk

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

v_s = volume spesifik udara pada sisi masuk

b_1, D_1, V_{f1}, v_{s1} = variabel yang sama untuk sisi keluar

m = massa udara yang mengalir melalui impeller

Massa udara yang mengalir melalui impeller pada sisi masuk:

$$m = \frac{\pi D b \cdot V_f}{v_s} \quad \dots (i)$$

Dengan cara yang sama, massa udara yang mengalir di sisi keluar:

$$m = \frac{\pi D_1 b \cdot V_{f1}}{v_{s1}} \quad \dots \text{(ii)}$$

Karena massa udara yang mengalir melalui impeller adalah konstan, maka:

$$\frac{\pi D b \cdot V_f}{v_s} = \frac{\pi D_1 b_1 \cdot V_{f1}}{v_{s1}} \quad \dots \text{(iii)}$$

Catatan: Kadang-kadang jumlah dan ketebalan sudu juga diperhitungkan. Dalam hal ini, massa udara yang mengalir melalui impeller pada sisi masuk:

$$m = \frac{(\pi D - n b) V_f}{v_s}$$

dimana n adalah jumlah sudu.

Contoh soal

Sebuah kompresor udara sentrifugal mempunyai diameter dalam dan luar masing-masing 25 cm dan 50 cm, mengkompresi 30 kg udara per menit pada 4000 rpm. Sudut vane pada sisi masuk dan keluar masing-masing adalah 30° dan 40° . Carilah ketebalan sudu, jika impeller mempunyai 40 sudu. Ambil harga volume spesifik udara $0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Jawab

Diketahui: $D = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$; $D_1 = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$; $m = 30 \text{ kg}/\text{min} = 0,5 \text{ kg}/\text{s}$; $N = 4000 \text{ rpm}$; $\theta = 30^\circ$; $\phi = 40^\circ$; $n = 40$; $v_s = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$

Kecepatan impeller pada sisi keluar:

$$V_b = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 0,25 \times 4000}{60} = 52,4 \text{ m/s}$$

Kecepatan pada sisi masuk:

$$V_f = V_b \tan 30^\circ = 52,4 \times 0,577 = 30,2 \text{ m/s}$$

Maka:

$$m = \frac{(\pi D - n b) V_f}{v_s}$$

$$0,5 = \frac{(\pi \times 0,25 - 40 b) \times 30,2}{0,8}$$

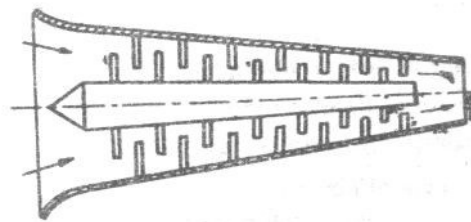
$$0,0132 = \pi \times 0,25 - 40 b$$

$$40 b = 0,7854 - 0,0132 = 0,7722$$

$$b = 0,019 \text{ m} = 1,9 \text{ cm}$$

Kompresor Aliran Aksial

Dalam bentuk yang sederhana, kompresor aliran aksial terdiri dari sejumlah baris sudu putar yang terpasang pada *drum* yang berputar. *Drum* berputar di dalam *casing* yang kedap udara dimana terdapat barisan sudu diam, seperti ditunjukkan oleh gambar 9.9.



Gambar 9.9. Kompresor aliran aksial.

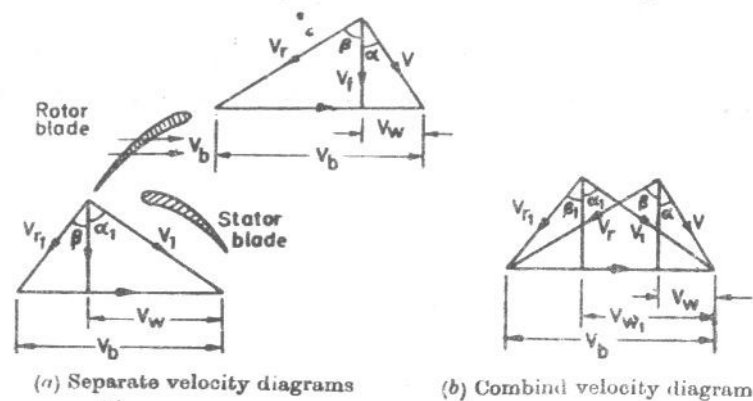
Energi mekanik diberikan oleh poros yang berputar yang memutar *drum*. Udara masuk dari sisi kompresor. Ketika *drum* berputar, udara mengalir diantara stator dan rotor. Ketika udara mengalir dari satu pasangan stator dan rotor, udara mengalami kompresi, dan begitu seterusnya. Udara dlepaskan di bagian katup keluar dalam keadaan tekanan tinggi.

Perbedaan Antara Kompresor Udara Sentrifugal dengan Aliran Aksial

Berikut diberikan perbedaan-perbedaan utama antara kompresor sentrifugal dengan kompresor aliran aksial.

No.	<i>Kompresor Sentrifugal</i>	<i>Kompresor Aliran Aksial</i>
1.	Aliran udara tegak lurus terhadap sumbu kompresor	Aliran udara paralel dengan sumbu kompresor.
2.	Mempunyai biaya pembuatan dan operasi yang rendah	Mempunyai biaya pembuatan dan operasi yang tinggi.
3.	Memerlukan torsi awal yang rendah.	Memerlukan torsi yang besar untuk start.
4.	Tidak sesuai untuk banyak tingkat.	Cocok untuk banyak tingkat.
5.	Memerlukan Luas penampang yang besar untuk laju aliran besar.	Memerlukan luas penampang yang kecil untuk laju aliran yang besar. Cocok untuk penggunaan dipesawat udara.

Diagram Kecepatan untuk Kompresor Udara Aliran Aksial



Gambar 9.10. Diagram kecepatan untuk kompresor aliran aksial.

Pada kompresor aksial, *drum* dengan sudu rotor berputar di dalam *casing* yang mempunyai sudu stator yang tetap. Segitiga kecepatan sisi masuk dan sisi keluar untuk sudu rotor ditunjukkan oleh gambar 9.10 (a) dan (b). Hubungan antara segitiga kecepatan sisi masuk dan keluar adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan sudu (V_b) untuk kedua segitiga adalah sama.
2. Kecepatan Aliran (V_f) untuk kedua segitiga adalah sama.
3. Kecepatan relatif pada segitiga sisi keluar (V_{r1}) lebih kecil dari kecepatan relatif pada sisi masuk (V_r) disebabkan oleh gesekan.

Catatan: 1. Kerja kompresor per kg udara:

$$W = \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g} \quad \dots \text{ (dalam satuan kerja)}$$

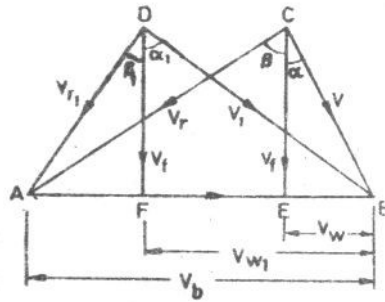
$$= \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g \cdot J} \quad \dots \text{ (dalam satuan kalor)}$$

2. Kadang-kadang faktor kerja atau faktor kerja input juga diberikan. Dalam hal ini, kerja kompresor per kg udara adalah (dalam satuan kerja)

$$= \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g} \times \text{faktor kerja}$$

Derajat Reaksi

Merupakan istilah penting dalam pembahasan kompresor aliran aksial. Derajat Reaksi didefinisikan sebagai rasio kenaikan tekanan pada sudu rotor terhadap kenaikan tekanan pada kompresor satu tingkat.



Gambar 9.11. Diagram segitiga kecepatan dengan derajat reaksi 50%.

Derajat reaksi biasanya dijaga pada angka 50% atau 0,5 untuk semua jenis kompresor aliran aksial. Secara matematik, derajat reaksi dirumuskan:

$$R = \frac{\text{Kenaikan tekanan pada sudu rotor}}{\text{Kenaikan tekanan pada kompresor}}$$

$$= \frac{\frac{V_r^2 - V_{r1}^2}{2g}}{\frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g}} = \frac{V_r^2 - V_{r1}^2}{2V_b(V_{w1} - V_w)}$$

Dari segitiga kecepatan diperoleh:

$$R = \frac{V_f(\tan \beta + \tan \beta_1)}{2V_b}$$

Untuk derajat reaksi 50%:

$$\frac{V_b}{V_f} = \tan \beta + \tan \beta_1$$

Dari geometri segitiga kecepatan:

$$\begin{aligned} \frac{V_b}{V_f} &= \tan \alpha + \tan \alpha_1 = \tan \alpha + \tan \beta \\ &= \tan \alpha_1 + \tan \beta_1 \end{aligned}$$

$$\therefore \angle \beta = \angle \alpha_1 \text{ dan } \angle \beta_1 = \angle \alpha$$

Contoh soal

Sebuah kompresor aliran aksial, dengan rasio kompresi 5, menghisap udara pada 20°C dan melepaskannya pada 50°C . Diasumsikan 50% derajat reaksi, kecepatan sudu 50%, carilah kecepatan aliran jika kecepatan sudu adalah 100 m/s. Cari juga jumlah tingkat. Ambil faktor kerja = 0,85, $\alpha = 10^{\circ}$; $\beta = 40^{\circ}$ dan $C_p = 0,24$.

Jawab

Diketahui: $p_2/p_1 = 5$; $T_1 = 20^{\circ}\text{C} = 20^{\circ} + 273 = 293^{\circ}\text{K}$; $T_2 = 50^{\circ}\text{C} = 50^{\circ} + 273 = 323^{\circ}\text{K}$; $R = 50\%$; $V_b = 100\text{ m/s}$; faktor kerja = 0,85; $\alpha = 10^{\circ}$; $\beta = 40^{\circ}$; $C_p = 0,24$.

Kecepatan Aliran

Dari geometri segitiga kecepatan:

$$\frac{V_b}{V_f} = \tan \alpha + \tan \beta = \tan 10^{\circ} + \tan 40^{\circ}$$

$$\frac{100}{V_f} = 0,1763 + 0,8391 = 1,0154$$

$$V_f = 98,5\text{ m/s}$$

Jumlah Tingkat

Kerja yang diperlukan per kg udara:

$$= C_p (T_2 - T_1) = 0,24 (323 - 293)$$

$$= 7,2\text{ kcal}$$

Dari geometri segitiga kecepatan,

$$V_w = V_f \tan \alpha = 98,5 \times \tan 10^{\circ}$$

$$= 98,5 \times 0,1763 = 17,4\text{ m/s}$$

dan $V_{w1} = V_f \tan \alpha_1 = 98,5 \times \tan 40^{\circ}$... (dengan derajat reaksi

$$50\%, \angle \alpha_1 = \angle \beta)$$

$$= 98,5 \times 0,8391 = 82,7\text{ m/s}$$

Kerja per kg udara per tingkat:

$$W = \frac{V_b (V_{w1} - V_w)}{g \cdot j} \times \text{faktor kerja}$$

$$= \frac{100(82,7 - 17,4)}{9,81 \times 427} \times 0,85 = 1,3 \text{ kcal}$$

$$\therefore \text{Jumlah tingkat : } = \frac{7,2}{1,3} = 5,6 \approx 6$$

C. UNJUK KERJA KOMPRESOR

Efisiensi suatu mesin secara umum adalah rasio kerja yang dilakukan dengan energi yang dibrikan. Kriteria efisiensi termodinamik kompresor torak adalah isothermal dan kompresor sentrifugal adalah isentropik. Berikut ini akan dibicarakan efisiensi untuk kedua jenis kompresor ini.

Efisiensi Kompresor Torak

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa kriteria efisiensi termodinamik kompresor torak adalah isothermal. Namun secara umum, efisiensi-efisiensi berikut perlu untuk diketahui.

1. Efisiensi Isothermal (atau efisiensi kompresor)

Adalah rasio kerja (atau daya) yang diperlukan untuk mengkompresi udara secara isothermal terhadap kerja sebenarnya yang diperlukan. Secara matematik dirumuskan:

$$\eta_c = \frac{\text{daya kuda isothermal}}{\text{daya kuda indikated}}$$

$$= \frac{\text{kerja isothermal}}{\text{kerja indikated}}$$

2. Efisiensi Isothermal Keseluruhan

Adalah rasio daya kuda isothermal terhadap daya kuda poros atau daya kuda *brake* (brake horse power) dari motor atau mesin yang diperlukan oleh kompresor. Secara matematik dirumuskan:

$$= \frac{\text{daya kuda isothermal}}{\text{daya kuda poros atau BHP motor}}$$

BHP = Brake Horse Power (Daya Kuda *Brake*)

3. Efisiensi Mekanik

Adalah rasio daya kuda indikated terhadap daya kuda poros atau daya kuda *brake* mesin penggerak. Secara matematik dirumuskan:

$$\eta_m = \frac{\text{daya kuda indikated}}{\text{daya kuda poros atau BHP motor}}$$

4. Efisiensi Adiabatik

Adalah rasio daya kuda adiabatik terhadap daya kuda untuk menggerakkan kompresor. Secara matematik dirumuskan:

$$\eta_a = \frac{\text{daya kuda adiabatik}}{\text{BHP untuk menggerakkan kompresor}}$$

5. Efisiensi Volumetrik

Adalah rasio volume udara bebas yang dilepaskan per langkah terhadap volume sapuan piston. Efisiensi volumetrik pada kompresor torak berbeda antara kompresor dengan *clearance* dan tanpa *clearance*.

Catatan: Karena sulit untuk memvisualisasikan kondisi NTP. udara sapuan, kondisi yang banyak digunakan adalah mendefinisikan efisiensi volumetrik sebagai rasio volume udara sebenarnya yang dihisap oleh kompresor terhadap volume sapuan piston.

Contoh soal

Sebuah kompresor resiprokal (torak) menghisap udara sebanyak 6 kg/min pada 25⁰ C. Kompresor mengkompresi udara secara politropik membuang udara pada 105⁰ C. Carilah daya kuda udara. Jika daya kuda poros 18, carilah efisiensi mekanik. Diasumsikan $R = 29,3 \text{ kgm/kg}^0\text{K}$ dan $n = 1,3$.

Jawab

Diketahui: $m = 6 \text{ kg}$; $T_1 = 25^0 \text{ C} = 298^0 \text{ K}$; $T_2 = 105^0 \text{ C} = 378^0 \text{ K}$; daya kuda poros = 18 hp ; $R = 29,3 \text{ kgm/kg}^0\text{K}$; $n = 1,3$.

Daya kuda udara

$W = \text{kerja kompresor}$

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} mR(T_2 - T_1) \\ &= \frac{1,3}{1,3-1} \times 6 \times 29,3(378 - 298) \end{aligned}$$

$$= 60.940 \text{ kg-m/min}$$

∴ daya kuda udara:

$$= \frac{60.940}{4.500} = 13,54 \text{ hp}$$

Efisiensi mekanik

Efisiensi mekanik:

$$\eta_m = \frac{\text{daya kuda udara}}{\text{daya kuda poros}} = \frac{13,54}{18,0}$$

$$= 0,752 = 75,2 \%$$

Contoh soal

Sebuah kompresor menghisap 42,5 m³ udara per menit ke dalam silinder pada tekanan 1,05 kg/cm² abs. Udara dikompresi secara politropik ($pv^{1,3} = C$) hingga tekanan 4,2 kg/cm² abs sebelum dilepaskan ke penampung. Diasumsikan efisiensi mekanik adalah 80%, carilah:

1. Daya kuda indikated.
2. Daya kuda poros.
3. Efisiensi isothermal keseluruhan.

Jawab

Diketahui: $v_1 = 42,5 \text{ m}^3/\text{min}$; $p_1 = 1,05 \text{ kg/cm}^2 = 1,05 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,3$; $p_2 = 4,2 \text{ kg/cm}^2 = 4,2 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $\eta_m = 80\% = 0,8$

1. *Daya kuda indikated*

W = kerja indikated kompresor

$$W = \frac{n}{n-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,3}{1,3-1} \times 1,05 \times 10^4 \times 42,5 \left[\left(\frac{4,2}{1,05} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right]$$

$$= 1,934 \times 10^3 (1,377 - 1)$$

$$= 729,1 \times 10^3 \text{ kg-m/min}$$

∴ Daya kuda indikated, IHP :

$$IHP = \frac{729,1 \times 10^3}{4500} = 162,0 \text{ hp}$$

2. Daya kuda poros

Daya kuda poros:

$$= \frac{\text{daya kuda indikated}}{\text{efisiensi mekanik}}$$

$$= \frac{162,0}{0,8} = 202,5 \text{ hp}$$

3. Efisiensi isothermal keseluruhan

Kerja isothermal/min:

$$W = p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$= 1,05 \times 10^4 \times 42,5 \ln \left(\frac{4,2}{1,05} \right)$$

$$= 617,8 \times 10^3 \text{ kgm/min}$$

∴ dayakuda isothermal:

$$= \frac{617,8 \times 10^3}{4.500} = 137,3 \text{ hp}$$

Efisiensi isothermal keseluruhan:

$$\eta_o = \frac{\text{daya kuda isothermal}}{\text{daya kuda poros}} = \frac{137,3}{202,5}$$

$$= 0,678 = 67,8\%$$

Efisiensi Volumetrik Kompresor Torak dengan Clearance

Misalkan sebuah kompresor torak aksi tunggal dengan volume clearance, seperti gambar 9.2.

Bila, p_1 = tekanan awal udara (sebelum kompresi)

v_1 = volume awal udara (sebelum kompresi)

T_1 = temperatur awal udara (sebelum kompresi)

p_2, v_2, T_2 = tekanan, volume, dan temperatur untuk kondisi akhir (yaitu pada titik keluar)

p_a, v_a, T_a = tekanan, volume, dan temperatur untuk kondisi ambien (yaitu N, T, P)

v_c = volume clearance

n = indeks politropik

Pada proses ekspansi politropik 3-4:

$$p_2 \cdot v_c^n = p_1 \cdot v_4^n$$

$$\therefore v_4 = v_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

dan rasio clearance:

$$K = \frac{v_c}{v_s} = \frac{v_c}{v_1 - v_c}$$

\therefore efisiensi volumetrik :

$$\eta_v = \frac{(v_1 - v_4)}{v_s} = \frac{(v_s + v_c) - v_4}{v_s}$$

$$= \frac{v_s + v_c - v_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}}{v_s} \quad \dots \quad \left[v_4 = v_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$$= 1 + k - k \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \dots \quad \left(\frac{v_c}{v_s} = k \right)$$

$$= 1 + k - k \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad \dots \quad \left[\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

Contoh soal

Sebuah kompresor torak satu tingkat aksi tunggal dengan 5% volume clearance mengkompresi udara dari 1 bar hingga 5 bar. Carilah perubahan efisiensi volumetrik kompresor, jika eksponen proses ekspansi berubah dari 1,25 ke 1,4.

Jawab:

Diketahui: $v_c = 5\%$ dari volume awal $= 0,05 v_1$; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $p_2 = 5 \text{ bar} = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

rasio clearance:

$$K = \frac{v_c}{v_1 - v_c} = \frac{0,05 v_1}{v_1 - 0,05 v_1} = \frac{0,05}{0,95} = 0,053$$

Efisiensi volumetrik:

$$\eta_v = 1 + k - k \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{Untuk } n = 1,25 \quad = 1 + 0,053 - 0,053 \left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1}{1,25}} = 0,861$$

$$\text{Untuk } n = 1,4 \quad = 1 + 0,053 - 0,053 \left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,886$$

\therefore perubahan efisiensi volumetrik:

$$= 0,886 - 0,861 = 0,025 = 2,5\%$$

Efisiensi Kompresor Sentrifugal

1. Efisiensi Isentropik (atau efisiensi kompresor)

Adalah rasio kerja (atau daya) yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara secara isentropik terhadap kerja aktual yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara untuk rasio tekanan yang sama.

Secara matematik, dirumuskan:

$$\eta_i = \frac{h_2' - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

dimana, h_2' = enthalpi udara pada sisi keluar untuk kompresi isentropik.

h_2 = enthalpi udara pada sisi keluar untuk kompresi aktual.

h_1 = enthalpi udara pada sisi masuk.

T_2' , T_2 , T_1 = temperatur pada titik yang bersesuaian.

2. Efisiensi Politropik

Adalah rasio kerja (atau daya) yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara secara politropik terhadap kerja aktual yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara untuk rasio tekanan yang sama.

Secara matematik, dirumuskan:

$$\eta_p = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \times \left(\frac{n}{n - 1} \right)$$

dimana, γ = rasio kalor spesifik

n = indeks politropik

Contoh soal

Pompa sentrifugal dengan efisiensi isentropik 70% melepaskan 20 kg udara per menit pada tekanan 3 bar. Jika kompresor menerima udara pada 20⁰ C dan tekanan 1 bar, carilah temperatur aktual udara pada sisi keluar. Cari juga daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor, jika efisiensi mekanik 95%. Ambil γ dan C_p masing-masingnya adalah 1,4 dan 1,0.

Jawab

Diketahui: $\eta_i = 70\% = 0,7$; $m = 20$ kg/min ; $p_2 = 3$ bar ; $T_1 = 20^0$ C = 293⁰ K ; $p_1 = 1$ bar ;
 $\eta_m = 95\% = 0,95$

Temperatur aktual udara pada sisi keluar

dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{T_2'}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

dimana T_2' = temperatur udara pada sisi keluar untuk kompresi isentropik.

$$\frac{T_2'}{293} = \left(\frac{3}{1}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,369$$

$$T_2' = 293 \times 1,369 = 401,1^0 \text{ K}$$

dengan menggunakan persamaan:

$$\eta_i = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$0,7 = \frac{401,1 - 293}{T_2 - 293}$$

$$0,7 T_2 - 205,1 = 401,1 - 293 = 108,1$$

$$T_2 = 447,4^0 \text{ K} = 174,1^0 \text{ C}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor

Kerja yang dilakukan untuk mengkompresi udara secara isentropik:

$$\begin{aligned} W &= m \cdot C_p (T_2 - T_1) \\ &= 20 \times 1,0 (447,4 - 293) = 3.088 \text{ kJ/min} \\ &= 51,47 \text{ kJ/sec} = 51,47 \text{ kNm/sec} \end{aligned}$$

\therefore daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor:

$$= \frac{51,47}{0,95} = 54,2 \text{ kW}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal mempunyai rasio kompresi 2,4 mengkompresi udara secara politropik sesuai dengan persamaan $pv^{1,6} = \text{konstant}$. Carilah efisiensi politropik kompresor, jika $C_p = 0,237$ dan $C_v = 0,169$.

Jawab

Diketahui: $p_2/p_1 = 2,4$; $n = 1,6$; $C_p = 0,237$; $C_v = 0,169$

$$\begin{aligned} \therefore \gamma &= \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right) \times \left(\frac{n}{n-1} \right) \\ &= \frac{1,4-1}{1,4} \times \frac{1,6}{1,6-1} \\ &= 0,762 = 76,2\% \end{aligned}$$

Faktor Slip

Seperti telah dibicarakan sebelumnya bahwa kerja ideal atau maksimum oleh kompresor sentrifugal:

$$= \frac{W}{g} \times V_{w1}^2 = \frac{W}{g} \times V_b^2$$

Persamaan di atas diturunkan dengan asumsi bahwa $V_{w1} = V_b$. Tetapi dalam kondisi nyata, V_{w1} selalu lebih kecil dari V_b . Perbedaan antara V_b dan V_{w1} (yaitu: $V_b - V_{w1}$) disebut dengan *slip*. Dan rasio V_{w1} terhadap V_b (yaitu: V_{w1} / V_b) disebut dengan *faktor slip*.

Perbandingan Antara Sudu Turbin Dengan Sudu Kompresor Sentrifugal

Berikut ini perbedaan utama antara sudu turbin dengan kompresor.

No.	<i>Sudu Turbin</i>	<i>Sudu Kompresor Sentrifugal</i>
1.	Jalur antara sudu konvergen	Jalur antara sudu divergen
2.	Karena jalur konvergen, aliran dipercepat, tetapi tekanan menurun.	Karena jalur divergen, aliran menyebar atau mengalami perlambatan, tetapi tekanan naik.
3.	Aliran lebih stabil	Aliran kurang stabil.
4.	Aliran selalu terjadi dalam satu arah.	Kadang-kadang aliran memecah dan berbalik arah.
5.	Sudu sederhana dalam desain dan konstruksi, karena profilnya terdiri dari busur melingkar dan garis lurus.	Sudu rumit dalam desain dan konstruksi karena profilnya terdiri dari penampang sudu pesawat berdasarkan teori aerodinamik.

Soal-soal

1. Terangkan mengenai kerja kompresor udara torak satu tingkat.
2. Terangkan pengaruh volume clearance pada kompresor torak.
3. Apa yang dimaksud dengan kompresi tingkat jamak, sebutkan keuntungannya.
4. Kompresor udara satu tingkat dengan *bore* 300 mm dan langkah 400 mm mengkompresi udara dari tekanan 1 kg/cm² ke 5 kg/cm². Carilah daya yang diperlukan kompresor, jika kompresor beroperasi pada 200 rpm, apabila kompresi udara (i) isothermal, (2) adiabatik dengan indeks 1,4, (3) mengikuti persamaan $p v^{1,25} = C$.

Petunjuk: volume kompresor per menit:

$$= \pi/4 \times 0,3^2 \times 0,4 \times 200 = 5,65 \text{ m}^3/\text{min}$$

(jawab: 20,2 hp; 25,7 hp; 23,9 hp)

5. Kompresor udara satu tingkat melepaskan udara 15 kg/min setelah mengkompresi sesuai persamaan $p v^{1,32} = C$. Carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor, jika udara dihisap pada 27⁰ C dan rasio tekanan 20/3.

(jawab: 5.290 kg-m/s)

6. Sebuah kompresor udara menerima 9 kg udara per menit pada 15⁰ C dan 1 kg/cm² dan melepaskannya pada tekanan 6 kg/cm². Diasumsikan kompresi mengikuti persamaan $p v^{1,25} = C$, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Ambil efisiensi mekanik kompresor sebesar 80%. Abaikan *clearance*.

(jawab: 45,3 hp)

7. Perkirakanlah dayakuda kompresor udara dua tingkat untuk mengkompresi 280 m³ per jam udara pada 1 kg/cm² abs dan 10⁰ C ke tekanan akhir 34 kg/cm² abs. Penampung (*receiver*) antara mendinginkan udara ke 30⁰ C dan 6 kg/cm² abs. Diasumsikan efisiensi mekanik 85% dan indek kompresi 1,4.

(jawab: 50,13 hp)

DAFTAR PUSTAKA

1. Culp AC., *Prinsip Konversi Energi*. Erlangga, 1996
2. Khurmi, RS., *A Text Book of Hydraulics, Fluid Mechanics and Hydraulics Machines*. S. Chan & Company Ltd. 2002.
3. Khurmi RS., *A Text Book of Mechanical Technology*, S. Chan & Company Ltd. 2002.
4. Suryawan, Bambang. *Diktat Kuliah Pompa Dan Kompresor, Teori dan Penyelesaian*. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.