

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah *Jet Engine*

Mesin *jet* adalah sebuah jenis yang sering digunakan dalam pesawat. Prinsip seluruh mesin jet pada dasarnya sama, mereka mempercepat massa (udara dan hasil pembakaran) ke satu arah dan dari hukum ketiga Newton yaitu, apabila terjadi aksi maka akan menimbulkan reaksi. Mesin akan mengalami dorongan ke arah yang berlawanan. Ada beberapa macam jenis *Jet Engine* seperti *RamJet*, *TurboJet*, *Turboprop*, dan *Turbofan*.

Mesin ini menghirup udara dari depan dan mengkompresinya kemudian udara digabungkan dengan bahan bakar, dan dibakar. Pembakaran menyebabkan banyak peningkatan energi dari gas yang kemudian dibuang ke belakang mesin. Proses ini mirip dengan siklus empat-gerak, dengan induksi, kompresi, penyalaan, dan pembuangan terjadi secara berulang kali. Udara menghasilkan dorongan karena percepatan udara yang melaluinya, gaya yang sama dan berlawanan yang dihasilkan adalah dorongan bagi mesin.

Mesin *jet* mengambil massa udara yang relatif sedikit dan mempercepatnya dengan jumlah yang besar, dimana sebuah pendorong mengambil massa udara secara besar dan mempercepatnya dalam jumlah kecil. Pembuangan kecepatan tinggi dari mesin *jet* membuatnya efisien pada kecepatan tinggi (terutama kecepatan supersonik) dan pada ketinggian yang tinggi. Pada pesawat berkecepatan rendah dan terbang dengan jarak pendek yang menggunakan turbin gas, biasanya menggunakan *turboprop*, karena lebih efisien. Pesawat kecil (bukan pesawat komersial) biasanya menggunakan mesin piston, tetapi *turboprop* semakin lama semakin kecil dengan berkembangnya teknologi teknik.

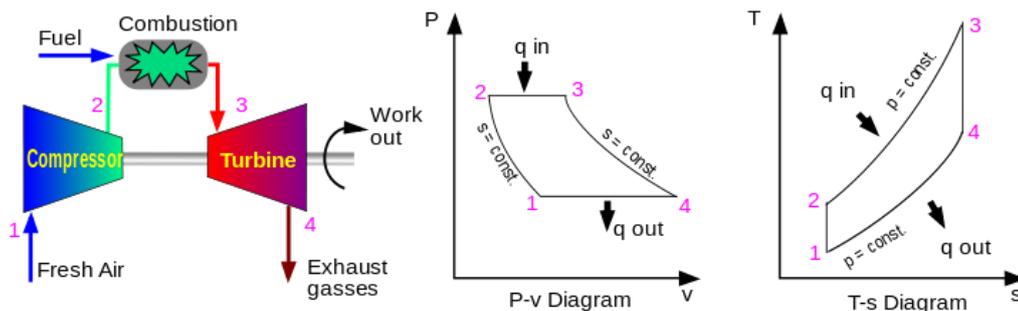
Efisiensi pembakaran sebuah mesin *jet*, seperti mesin pembakaran dalam lainnya, dipengaruhi besar oleh rasio *volume* udara yang dikompresi dengan *volume* pembuangan. Dalam mesin turbin kompresi udara dalam bentuk "*duct*"

yang melewati ruang pembakaran mencegah aliran balik dari situ dan membuat pembakaran berkelanjutan dimungkinkan, lalu menghasilkan dorongan.

Mesin *turbojet* modern modular dalam konsep dan rancangan. Inti dalam penghasilan tenaga utama hampir sama dengan seluruh mesin *jet* lainnya. Disebut sebagai *generator* gas dan juga modul tambahan lainnya seperti *gearset* pengurang dorongan (*turboprop/turboshaft*), *Fan*, dan "*afterburner*". Jenis alat tambahan dipasang berdasarkan penggunaan pesawat.

2.1.1 Tahap Awal dan Siklus Brayton

Siklus Brayton menjadi konsep dasar untuk setiap mesin turbin gas. Siklus termodinamika ini dikembangkan pertama kali oleh John Barber pada tahun 1791, dan disempurnakan lebih lanjut oleh George Brayton. Pada awal penerapan siklus ini Brayton dan ilmuwan lainnya mengembangkan mesin *reciprocating* dikombinasikan dengan kompresor. Mesin tersebut berdampingan dengan mesin Otto diaplikasikan pertama kali ke otomotif roda empat. Namun mesin Brayton kalah pamor dengan mesin Otto empat silinder yang dikembangkan oleh Henry Ford. Pada perkembangan selanjutnya, siklus Brayton lebih diaplikasikan khusus ke mesin-mesin turbojet dan turbin gas.



Gambar 2.1 Siklus Brayton [1]

Siklus Brayton melibatkan tiga komponen utama yakni kompresor, ruang bakar (*combustion chamber*), dan turbin. Media kerja udara atmosfer masuk melalui sisi *inlet* kompresor, melewati ruang bakar, dan keluar kembali ke atmosfer

setelah melewati turbin. Fenomena-fenomena termodinamika yang terjadi pada siklus Brayton ideal adalah sebagai berikut:

(1-2) Proses Kompresi Isentropik

Udara atmosfer masuk ke dalam sistem turbin gas melalui sisi *inlet* kompresor. Oleh kompresor, udara dikompresikan sampai tekanan tertentu diikuti dengan volume ruang yang menyempit. Proses ini tidak diikuti dengan perubahan entropi, sehingga disebut proses isentropik. Proses ini ditunjukkan dengan angka 1-2 pada kurva di atas.

(2-3) Proses Pembakaran Isobarik

Pada tahap 2-3, udara terkompresi masuk ke ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar, dan diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut. Energi panas hasil pembakaran diserap oleh udara (q_{in}), meningkatkan temperatur udara, dan menambah volume udara. Proses ini tidak mengalami kenaikan tekanan udara, karena udara hasil proses pembakaran bebas berekspansi ke sisi turbin. Karena tekanan yang konstan inilah maka proses ini disebut isobarik.

(3-4) Proses Ekspansi Isentropik

Udara bertekanan yang telah menyerap panas hasil pembakaran, berekspansi melewati turbin. Sudu-sudu turbin yang merupakan *nozzle-nozzle* kecil berfungsi untuk mengkonversikan energi panas udara menjadi energi kinetik. Sebagian energi tersebut dikonversikan turbin untuk memutar kompresor. Pada sistem pembangkit listrik turbin gas, sebagian energi lagi dikonversikan turbin untuk memutar generator listrik. Sedangkan pada mesin *turbojet*, sebagian energi panas dikonversikan menjadi daya dorong pesawat oleh sebetuk *nozzle* besar pada ujung keluaran turbin gas.

(4-1) Proses Pembuangan Panas

Tahap selanjutnya adalah pembuangan udara kembali ke atmosfer. Pada siklus Brayton ideal, udara yang keluar dari turbin ini masih menyisakan sejumlah energi panas. Panas ini diserap oleh udara bebas, sehingga secara siklus udara tersebut siap untuk kembali masuk ke tahap 1-2 lagi.

2.1.2 Teknologi Yang Digunakan Sekarang

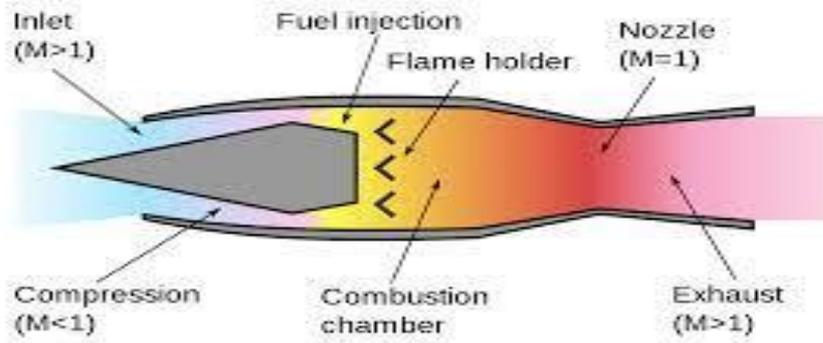
Inovasi terbaru dalam penerbangan mesin *jet* telah difokuskan pada pengurangan dampak lingkungan dan penyertaan bahan modern baru untuk mengurangi berat dan meningkatkan kinerja. Misalnya, Mesin GEnx dan LEAP *General Electric* telah mampu mengurangi emisi karbon dioksida sebesar 15%, dan meningkatkan efisiensi 15%, serta mengurangi jumlah kebisingan yang dihasilkan sebesar 30%. Mereka dengan ini berhasil menggunakan serat karbon untuk sudu yang memungkinkan mereka memotong jumlah sudu hingga setengahnya, dan menggunakan komposit keramik ringan era baru untuk sudu turbin yang memungkinkan *Boeing 787 dreamliner* membuat rekor jarak dan kecepatan baru pada penerbangan keliling dunia baru-baru ini. Teknologi inovatif lain yang baru-baru ini diperkenalkan adalah *Adaptive Versatile Engine Technology (ADVENT)* yang memungkinkan mesin *jet* saat ini untuk beralih antara mode kinerja tinggi dan mode efisiensi tinggi, yang tidak mungkin dilakukan sebelumnya. Melalui pengaturan aliran udara melalui saluran *bypass* kedua melalui kipas yang dapat disetel, mesin ADVENT dapat memprioritaskan daya dorong atau efisiensi tergantung pada situasinya (misalnya: lepas landas dan jelajah). Bersama dengan bahan dan aditif tahan panas baru teknik manufaktur, memungkinkan beberapa pesawat untuk mengurangi konsumsi bahan bakar sebesar 25%, meningkatkan jangkauan operasi sebesar 30%, dan meningkatkan daya dorong sebesar 10%.

2.2 Tipe – Tipe dari Jet Engine

Seiring dengan perkembangan zaman teknologi pada *engine* pesawat juga ikut berkembang, ada beberapa tipe dari perkembangan *Jet Engine* yaitu:

2.2.1 Ramjet

Meskipun menggunakan siklus brayton tetapi *engine* ini tidak seperti *Jet Engine* lainnya.

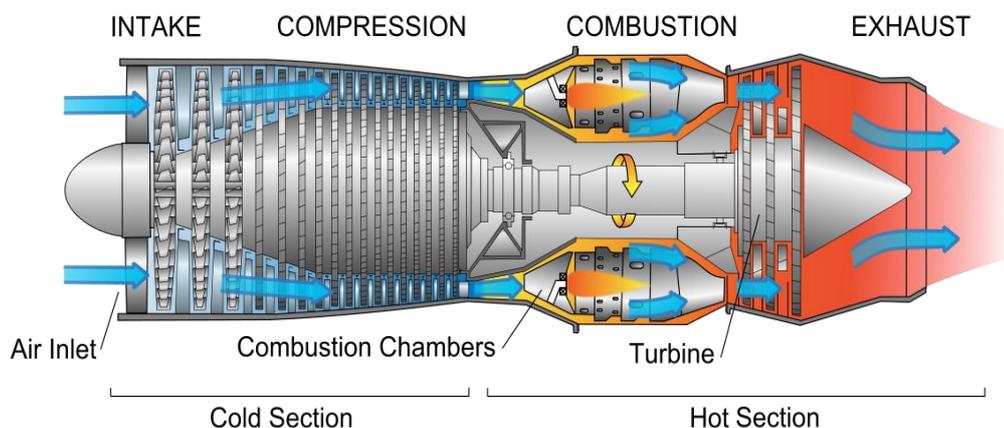


Gambar 2.2 *Ramjet* [2]

Ramjet dikatakan tidak sama dengan *Jet Engine* lainnya dikarenakan *Ramjet* tidak memiliki komponen yang bergerak. Pada kecepatan yang sangat tinggi, jumlah udara yang masuk pada penyempit atau pematat udara meningkatkan tekanan yang cukup untuk melakukan pembakaran. Ini dapat dimanfaatkan untuk menghilangkan *compressor* dan turbin, yang mana memungkinkan semua dorongan yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan pesawat. Akan tetapi, sebagai ganti dari tidak memiliki *compressor*, *Ramjet* hanya dapat beroperasi pada kecepatan tinggi.

2.2.2 *Turbojet*

Walaupun ada banyak macam jenis *engine*, *TurboJet* merupakan inti dari semua *Jet Engine*.

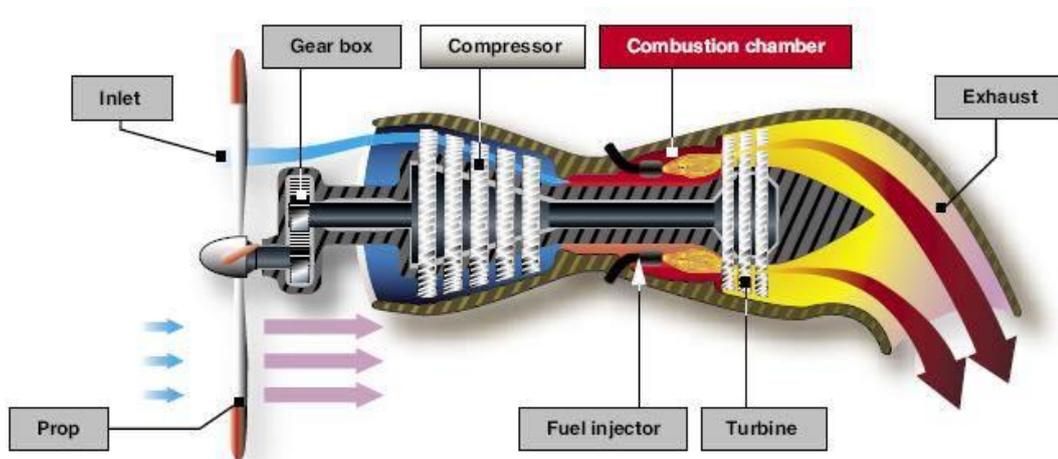


Gambar 2.3 *Turbojet* [3]

Udara akan masuk kedalam *Turbojet engine* dan kemudian dipadatkan melalui *compressor*, jumlah udara yang terkumpul kemudian dipadatkan melewati beberapa *rotor* dan *stator* sehingga volume nya mengecil. Udara bertekanan tinggi kemudian masuk ke *combustion chamber* atau ruang pembakaran dimana *fuel* dicampurkan dengan udara bertekanan tinggi tersebut dalam bentuk *vapor* atau uap lalu kemudian dibakar. Udara hasil pembakaran tersebut melewati turbin dan keluar dari *exhaust*, udara yang melalui turbin kemudian memutar turbin yang sebagian dimanfaatkan untuk memutar *compressor*. Walaupun sebagian besar *energy* tersebut digunakan untuk memutar *compressor*, hal tersebut membuat siklusnya menjadi lebih efisien. *Energy* yang tersisa kemudian melewati *exhaust* yang dipersempit dan diubah menjadi *energy kinetic* sehingga menghasilkan *thrust* atau dorongan.

2.2.3 Turboprop

Inti dari *engine* ini adalah *turbojet*, akan tetapi *compressor* pada *engine* ini dihubungkan dengan *propeller* pada bagian depan *engine*.

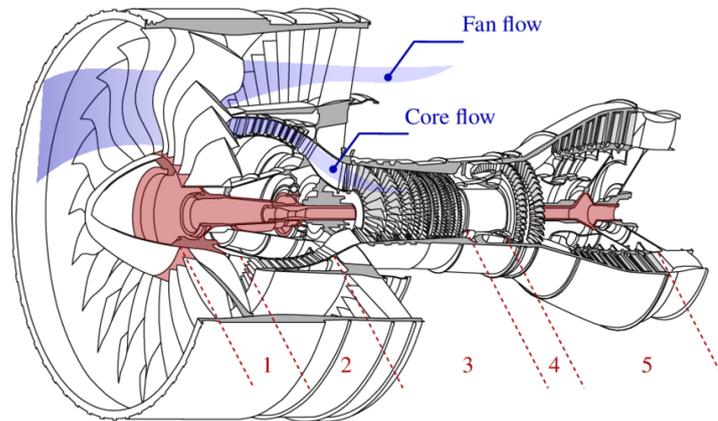


Gambar 2.4 Turboprop [4]

Dorongan yang dihasilkan dari pembakaran *jet engine* ini dimanfaatkan untuk memutar *compressor* dan *propeller*. Sebagai hasilnya, hanya sedikit *energy kinetic* yang tersisa keluar dari *exhaust*. *Propeller* menghasilkan hampir seluruh dari *thrust* untuk menggerakkan pesawat dan membantu udara mengalir masuk kedalam *jet*.

Turboprop lebih efisien saat berada pada kecepatan rendah karena *propeller* menjadi kurang efisien pada kecepatan tinggi.

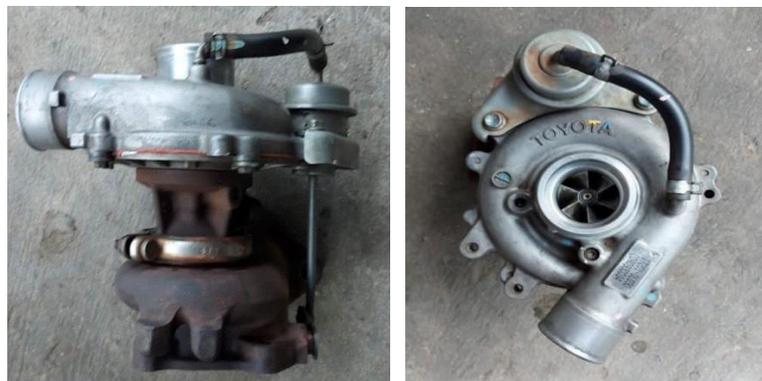
2.2.4 Turbofan



Gambar 2.5 Turbofan [5]

Inti dari *engine* ini adalah *turbojet engine*. Mirip dengan metode yang ada pada *turboprop*, pada bagian depan *compressor* terdapat kipas atau *fan* yang besar. *turbofan* dirancang untuk menghasilkan jumlah udara yang besar, dan sebagian udara yang dihasilkan mengalir melewati inti dari *engine* melalui *bypass*. Ini membantu memaksa sejumlah udara yang besar untuk masuk ke dalam *turbojet* dan meningkatkan gaya dorong, dan *bypass* berfungsi untuk membuatnya lebih efisien. Peningkatan kecepatan hanya membutuhkan volume udara yang sedikit untuk masuk ke dalam inti *engine*, maka dari itu sisa volume udara yang besar yang dihasilkan oleh *Fan* digunakan untuk membantu *engine* menghasilkan *thrust*.

2.3 Turbocharger



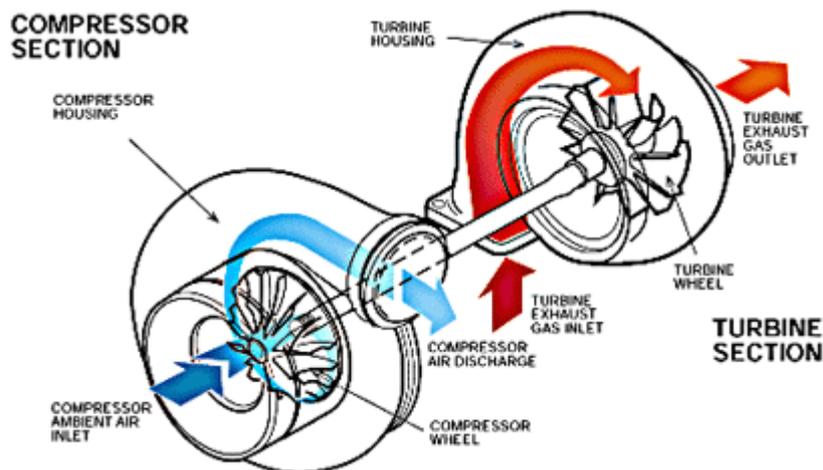
Gambar 2.6 Turbocharger [8]

Turbocharger adalah sebuah kompresor sentrifugal yang mendapat daya dari turbin yang sumber tenaganya berasal dari asap gas buang kendaraan. Biasanya digunakan di mesin pembakaran dalam untuk meningkatkan keluaran tenaga dan efisiensi mesin dengan meningkatkan tekanan udara yang memasuki mesin.

Turbocharger itu seperti mesin *jet*, dimana ada dua buah turbin yang terletak dalam satu poros. Turbin pertama kita sebut sebagai *drive turbin* karena fungsi sebagai pemutar, sementara turbin kedua kita sebut sebagai *driven turbin* karena ini akan diputar oleh turbin pertama.

2.3.1 Komponen *Turbocharger*

Turbocharger mempunyai beberapa komponen penyusun dan mempunyai fungsi masing-masing untuk menunjang kinerja dari *turbocharger*. Berikut ini penjelasan terkait komponen pada turbocharger.



Gambar 2.7 Komponen *Turbocharger* [6]

1. *Air Suction Branch*

Komponen ini biasa disebut dengan kompresor *chasing*. Komponen ini berfungsi untuk mengarahkan aliran udara yang dihisap oleh kompresor *blade*. Selain itu juga berfungsi untuk melindungi putaran kompresor *blade* dari benda asing yang tidak diinginkan.

2. *Silincer*

Bagian ini berfungsi untuk menyaring udara yang disedot oleh kompresor agar udara tetap bersih dari kotoran. *Silincer* ini terdiri dari *cover silincer* dan juga saringan kecil yang terbuat dari bahan tembaga atau yang biasa disebut *cooper mesh*.

3. *Turbin Chasing*

Komponen ini berfungsi untuk melindungi *turbin blade* sehingga dapat berputar dengan aman. Selain itu juga berfungsi untuk mengarahkan gas buang menuju *nozzle ring*. Di dalam ini juga terdapat *sistem cooling* untuk mendinginkan *turbocharger* agar tidak *overheating* karena gas buang.

4. *Bearing Housing*

Komponen ini berfungsi sebagai tempat dipasangnya *bearing ± bearing* pada *rotor*. Selain itu juga tempat dari oli/pelumasan pada *turbocharger*. Didalam *bearing housing* juga terdapat sistem pendinginan.

5. *Rotor*

Ini merupakan komponen yang berputar pada *turbocharger* dimana *rotor* terdiri dari *shaft*, *turbin blade* dan juga kompresor *blade*. Dimana *shaft* berfungsi untuk menghubungkan antara turbin dan kompresor. *Turbin blade* berfungsi untuk menangkan gaya yang diberikan oleh gas buang. Sedangkan kompresor *blade* berfungsi untuk menyedot udara.

6. *Bearing Set*

Berfungsi untuk mengurangi gesekan yang terjadi antara *rotor shaft* dengan *bearing housing*. *Turbocharger* dituntut untuk berputar dengan cepat sehingga harus diminimalisir sebisa mungkin gesekan yang terjadi.

7. *Compressor*

Compressor wheel pada komponen *turbocharge* yang berfungsi sebagai menghisap udara luar untk membantu pembakaran. Kompresor berasal dari material *aluminium alloy* untuk rasio kurang 4.5 Bar sedangkan dengan material titanium untuk rasio kompresi lebih dari 4.5 Bar.

8. *Turbine*

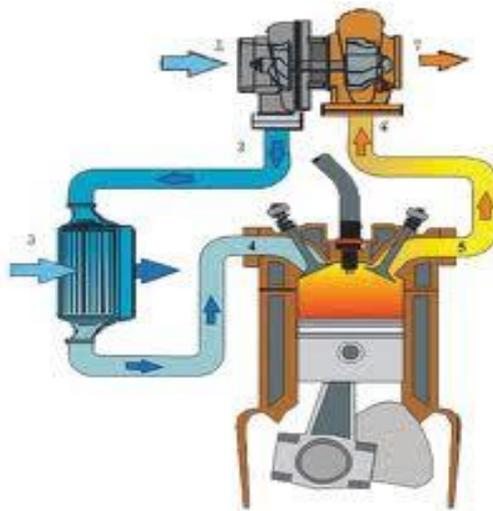
Dalam perkembangan sebagai *main part of components turbocharge*, *Turbine* terdiri atas 2 tipe yang sering digunakan. Pertama adalah tipe *Radial Turbine*, pada umumnya untuk tipe *radial turbine* digunakan pada *engine 500kW ± 4900kW*. Kedua adalah tipe *Axial Turbine*, biasanya digunakan pada *propulsor (slow ± medium speed engine)*, selain itu pada tipe ini mampu memberikan *supply power* pada *compressor* dengan kondisi *low pressure ratio* dengan *effisiensi* yang baik.

9. *Turbine Nozzle Ring*

Nozzle Ring yang ada pada *Turbine* difungsikan sebagai tempat masuknya udara selanjutnya akan berexpansi dengan kecepatan tinggi berlawanan arah terhadap sudu-sudu *Turbine* sehingga terdapat momen tangensial hingga *Turbine Wheel* berputar. Putaran dari *Turbine* tersebut akan berakibat pada ikut berputarnya *Compressor*.

2.3.2 Cara Kerja *Turbocharger*

Cara kerjanya, seperti kompresor dimana ketika turbin ini berputar maka akan mempercepat aliran udara ke salah satu arah. Dalam hal ini, *driven turbin* terletak ditengah aliran udara *intake*. Sehingga, saat *driven turbin* berputar, udara didalam *intake* akan mengalir lebih cepat ke arah ruang bakar.



Gambar 2.8 Cara Kerja *Turbocharger* [7]

Sumber tenaga untuk memutar *driven* turbin itu berasal dari mesin itu sendiri. Tepatnya pada gas buang, gas sisa pembakaran ini masih memiliki sisa energi berupa hembusan yang tidak kecil. Kalau kita letakan turbin ditengah aliran gas buang, maka turbin tersebut akan berputar dengan kecepatan sesuai hembusan gas buang.

Dalam hal ini, *drive* turbin diletakan didalam *exhaust manifold* dan antara *drive* turbin dan *driven* turbin juga dibuat dalam satu poros. Sehingga, saat *drive* turbin berputar karena hembusan gas buang, *driven* turbin juga akan berputar untuk memompa udara lebih banyak ke mesin.

Semakin tinggi RPM mesin, semakin tinggi juga hembusan gas *exhaust*. Ini membuat putaran turbin semakin cepat, sehingga bisa dikatakan semakin tinggi RPM mesin semakin besar pula pompaan udara kedalam ruang bakar.

2.4 Tipe Aliran Kompresor

Kompresor adalah suatu mesin fluida yang berfungsi untuk merubah energi kinetik menjadi energi tekan dengan prinsip kerjanya memindahkan fluida kompresibel dari tekanan rendah ke tekanan lebih tinggi untuk menghasilkan udara bertekanan dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu:

1. Menurunkan volume ruang tertutup.
2. Memberikan tambahan energi dengan sudu-sudu putar ke fluida.

Beberapa bentuk penggunaan kompresor antara lain adalah:

1. Kompresor udara untuk berbagai keperluan.
2. *Blower* udara sederhana dalam pengolahan sulfur.
3. *Blower* udara kapasitas besar dalam unit katalis.
4. Kompresor *refrigerant temperature* rendah yang digunakan untuk unit pengolahan *ethylene* dan *pethylen*.

2.4.1 Kompresor Putar/Rotary

Kompresor *Rotary* mempunyai rator dalam suatu tempat dengan piston dan memberikan pengeluaran kontinyu bebas denyutan. Kompresor beroperasi pada kecepatan tinggi dan umumnya menghasilkan hasil keluaran yang lebih tinggi dibandingkan kompresor *Reciprocating*. Biaya investasinya rendah, bentuknya kompak, ringan dan mudah perawatannya, sehingga kompresor ini sangat populer

di industri. Biasanya digunakan dengan ukuran 30 sampai 200 hp atau 22 kw sampai 150 kw. jenis dari kompresor putar adalah:

- a. Kompresor *Lobe (Root Blower)*.
- b. Kompresor Ulir.
- c. Jenis baling-baling putar/baling-baling luncur.

2.4.2 Radial Flow (Centrifugal) Compressor

Kompresor Radial adalah Kompresor yang menggunakan sistem sentrifugal dengan putaran tinggi (300-400) biasanya digerakkan oleh turbin uap atau turbin gas yang mempunyai karakteristik yang hampir sama. Kompresor ini biasanya digunakan untuk *supercharger* motor berdaya besar, terutama diesel. Didalam kompresor radial, sifat-sifat gas yang dipindah terutama volume jenis dan temperatur harus diperhitungkan.

2.4.3 Axial Flow Compressor

Pada kompresor aksial, umumnya fluida gas bergerak secara paralel dengan *Shaft* Dinamik. *Energy* diberikan oleh *Blade Stator* dengan pengaruh penambahan pada densitas gas dan tekanan statis.

2.4.4 Kompresor Sentrifugal

Berdasarkan hukum kekekalan energi bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, Tetapi energi hanya dapat dikonversikan dari suatu bentuk energi ke energi yang lainnya. Begitu juga kompresor sentrifugal juga menggunakan prinsip konversi energi untuk menaikkan tekanan. Kompresor Sentrifugal termasuk dalam kelompok kompresor dinamik adalah kompresor dengan prinsip kerja mengkonversikan energi kecepatan gas/udara yang dibangkitkan oleh aksi/gerakan *impeller* yang berputar dari energi mekanik unit penggerak menjadi energi potensial (tekanan) di dalam *diffuser*.

Proses kerja kompresor sentrifugal adalah kompresor yang bekerja dengan memberikan tambahan energi pada udara atau gas melalui gaya sentrifugal yang diberikan oleh *impelernya*. Gas dihisap kedalam kompresor melalui saluran hisap kemudian diteruskan kedalam Diafragma yang berfungsi sebagai pengarah aliran dan selanjutnya masuk kedalam *impeller*, kemudian *impeller* memberikan pusaran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Akibat dari putaran yang tinggi tersebut maka

gas akan terlempar keluar dari *impeller* karena adanya gaya sentrifugal yang terjadi, kemudian tekanan dan kecepatan dari gas akan naik setelah gas lepas dari ujung *impeller*. Gas diperlambat dalam suatu saluran yang disebut *diffuser*, yang ternyata lebih mudah dan efisien untuk mempercepat aliran dibandingkan memperlambat. Karena dengan diperlambat aliran cenderung tersebar dengan tidak terarah. Akibat dari aliran tidak terarah akan menyebabkan adanya kecenderungan timbulnya aliran *turbulance* dan arus *steady*, yaitu merubah energi kinetik menjadi energi panas dari energi-energi tekanan. Oleh karena itu perlu di jaga aliran tersebut tetap searah dengan memasang penyearah (*Guide Vane*).

A. Karakteristik

Karakteristik kompresor sentrifugal secara umum sebagai berikut:

1. Aliran *discharge uniform*.
2. Kapasitas tersedia dari kecil sampai besar.
3. Tekanan *discharge* dipengaruhi oleh *density* gas/udara.
4. Mampu memberikan unjuk kerja pada efisiensi yang tinggi dengan beroperasi pada *range* tekanan dan kapasitas yang besar.

Kompresor ini umumnya beroperasi pada putaran tinggi, diatas 3000 rpm digerakkan oleh motor listrik atau turbin uap. Untuk tekanan *discharge* (keluaran) yang tinggi, dipakai kompresor bertingkat banyak (*Impeler* nya lebih dari satu) Ada juga kompresor yang mempunyai aliran hisap bertingkat lebih dari satu dengan pendingin antara (*Intercooler*).

Kompresor sentrifugal pada dasarnya mempunyai keuntungan dan kerugian antara lain sebagai berikut:

B. Keuntungan Kompresor Sentrifugal

1. Mampu beroperasi dalam jangka waktu yang lama.
2. Kapasitas dan tekanan mudah di atur (baik dengan *discharge valve* atau dengan *variable speed*).
3. Aliran secara kontinyu dan seragam.
4. Vibrasi atau getaran relatif lebih rendah.

C. Kerugian Kompresor Sentrifugal

1. Kontruksinya lebih rumit (perlu ketelitian dalam pemasangannya agar efisiensi dapat dipertahankan).
2. Sangat peka terhadap sifat udara atau gas.
3. Biaya investasi relatif lebih tinggi.

2.5 Hubungan Antara *Turbocharger* dan *Jet Engine*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat dikatakan *Turbocharger* memiliki beberapa komponen yang hampir sama dengan *Turbojet*. Komponen utama yang dibutuhkan untuk membuat *Turbojet* adalah *Compressor*, *Combustion Chamber*, *Turbine*, dan *Exhaust (Nozzle)*. Pada *turbocharger* sudah terdapat dua komponen utama yaitu *Compressor* dan *Turbine*, dengan memodifikasi *turbo* tersebut kita dapat membuat *Jet Engine* dengan menambahkan *Combustion Chamber* dan *Exhaust*. Dengan menggunakan siklus brayton, kita dapat membuat *Turbojet Engine* yang berkerja dengan menambahkan komponen-komponen yang disebutkan tadi. Kebanyakan *jet engine* yang digunakan sekarang menggunakan aliran *axial*, akan tetapi ada juga yang menggunakan aliran *centrifugal*. *Compressor* pada *turbocharger* menggunakan aliran *centrifugal* sehingga tidak perlu dilakukan modifikasi pada *compressor* karena *jet engine* propultion menggunakan sistem yang sama. Dikarenakan alasan tersebut penulis memilih *turbocharger* sebagai *base* dari *engine* yang akan penulis buat.