

# MESIN – MESIN PANAS

SERIE FISIKA REKAYASA 1

# KONVERSI ENERGI

- Termodinamika
- Perpindahan Kalor
- Mekanika fluida Dasar
- Mesin Konversi Energi
- Mesin Fluida
- Teknik Pendingin & Tata Udara
- Energi Alternatif dan Terbaharukan

# Mesin Konversi Energi

- Definisi Energi, Jenis Konversi Energi
- Mesin Konversi Energi dan pengelompokannya
- Bahan bakar dan Pembakaran
- Turbin Uap, Siklus dan Unjuk kerja

# Mesin Konversi energi

- Motor Bakar siklus dan Unjuk kerja
- Pompa, karakteristik dan aplikasi
- Kompresor, karakteristik dan aplikasi
- Turbin Gas, siklus dan unjuk kerja
- Sistem Pendingin siklus dan unjuk kerja
- Sistem Propulsi & aplikasi perangkat lunak

# Energi

Definisi energi:

- tenaga atau gaya untuk berbuat sesuatu
- kemampuan untuk melakukan kerja

Satuan energi : Joule, BTU, therm, quad, kalori, eV, ton batubara, barrel minyak, dll

***Bentuk-Bentuk Energi:*** Energi Kinetik, Energi Potensial, Pegas, Gravitasi, Kimia, Energi Massa

# Bentuk-bentuk energi

6 Klasifikasi utama energi :

energi mekanik,

energi listrik,

energi elektromagnetik,

energi kimia,

energi nuklir

energi thermal

# Sumber Energi dan Konversi Dasarnya

- Kayu: Kimia → panas, listrik
- Angin: Kinetik → mekanika, listrik
- Air: Potensial → kinetik → mekanikal, listrik
- Batubara: Kimia → panas, listrik
- Minyak Bumi: Kimia → panas, listrik
- Gas Alam: Kimia → panas, listrik

# Sumber Energi dan Konversi Dasarnya

- Panas bumi: Panas → panas, listrik
- Nuklir: Kimia → panas, listrik
- Hidrogen: Kimia → panas, listrik
- Pasang surut: Kinetik → listrik
- Panas Laut: Panas → listrik (OTEC)
- Ombak Laut: Kinetik → listrik
- Arus Pancar: Kinetik → listrik



# Mesin Konversi Energi

- Mesin atau gabungan mesin untuk mengubah suatu bentuk energi ke bentuk energi yang lain yang dapat dimanfaatkan oleh manusia.
- Ruang lingkup : Motor pembakaran dalam, turbin, pompa dan kompresor, mesin pendingin dan mesin propulsi.
- Aplikasi → pembangkit tenaga listrik, membantu proses industri, transportasi, penerangan, dll

# Klasifikasi Mesin Konversi Energi

Berdasarkan fungsinya :

- Sebagai Penggerak : motor (motor listrik dan motor bakar, turbin (turbin air, turbin uap, turbin gas) dan mesin propulsi (turbo jet, turbo fan turbo prop, ram jet, roket)
- Sebagai yang digerakkan: pompa ( torak dan pompa kinetik) kompresor (aksial dan radial), mesin pendingin( kompresi uap, refrigerasi udara dan refrigerasi absorpsi) dll.

# Bahan Bakar

Berdasarkan wujudnya:

- Padat: kayu, batubara, sekam, biomassa lainnya
- Cair: minyak bumi dan turunannya
- Gas: gas alam, gas bumi, gas rawa

Kategori umum bahan bakar:

Bahan bakar fosil, bahan bakar nuklir dan energi surya

# MESIN KALOR

Adalah alat untuk mengubah energi kalor menjadi energi mekanik.

Contohnya adalah mesin kendaraan

Pada setiap pengubahan energi panas ke energi mekanik selalu disertai pengeluaran gas buang, yang membawa sejumlah energi panas hasil pembakaran bahan bakar yang diubah ke energi mekanik.

# HUKUM TERMODINAMIKA

# Arah Proses Termodinamik

- Proses termodinamik yang berlangsung secara alami seluruhnya disebut proses ireversibel (*irreversible process*). Proses tersebut berlangsung secara spontan pada satu arah tetapi tidak pada arah sebaliknya. Contohnya kalor berpindah dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah.
- Proses reversibel adalah proses termodinamik yang dapat berlangsung secara bolak-balik. Sebuah sistem yang mengalami idealisasi proses reversibel selalu mendekati keadaan kesetimbangan termodinamika antara sistem itu sendiri dan lingkungannya. Proses reversibel merupakan *proses seperti-kesetimbangan (quasi equilibrium process)*.

# Tiga pernyataan bagi Hukum Kedua Termodinamika

- Kalor tidak mengalir secara spontan dari dingin ke panas  
(sebaliknya: dapat spontan?)
- Tidak ada mesin yang dapat mengubah kalor menjadi usaha secara utuh  
(sebaliknya: dapat spontan?)
- Setiap sistem terisolasi condong menjadi acak  
(sistem terbuka: dapat menumbuhkan  
keteraturan?)

Kalor tidak akan mengalir spontan dari benda dingin ke benda panas

[Rudolf Clausius (1822 – 1888)]

- Pada taraf molekular:
  - Molekul yang bergerak lebih cepat, akan menyebarkan energinya kepada lingkungannya
- Pada taraf makroskopik:
  - Perlu pasokan energi / usaha, untuk mendinginkan sebuah benda



Anda tidak dapat membuat mesin yang sekedar mengubah kalor menjadi usaha sepenuhnya  
[Kelvin (1824 – 1907) & Planck (1858 – 1947)]

- Efisiensi mesin tidak dapat 100%
- Diperlukan tandon panas dan tandon dingin
- Tandon panas menjadi sumber energi
- Perlu membuang kalor pada suhu yang lebih rendah, ke tandon dingin
- Biasanya tandon suhu terendah = atmosfer

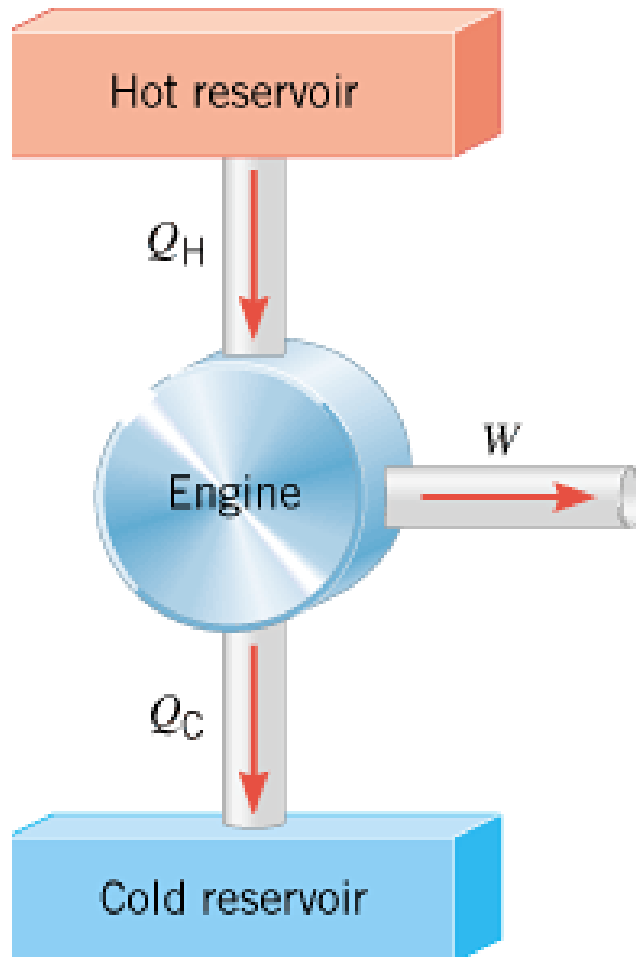
# Hukum II Termodinamika

- Jika tidak ada kerja dari luar, panas tidak dapat merambat secara spontan dari suhu rendah ke suhu tinggi (Clausius)
- Proses perubahan kerja menjadi panas merupakan proses irreversible jika tidak terjadi proses lainnya (Thomson-Kelvin-Planck)
- Suatu mesin tidak mungkin bekerja dengan hanya mengambil energi dari suatu sumber suhu tinggi kemudian membuangnya ke sumber panas tersebut untuk menghasilkan kerja abadi (Ketidakmungkinan mesin abadi)
- Mesin Carnot adalah salah satu mesin reversible yang menghasilkan daya paling ideal. Mesin ideal memiliki efisiensi maksimum yang mungkin dicapai secara teoritis

# MESIN KALOR

- Sebuah mesin kalor adalah sesuatu alat yang menggunakan **kalor/panas** untuk melakukan **usaha/kerja**.
- Mesin kalor memiliki tiga ciri utama:
  1. **Kalor** dikirimkan ke mesin pada **temperatur** yang relatif tinggi dari suatu tempat yang disebut *reservoir panas*.
  2. Sebagian dari kalor input digunakan untuk melakukan kerja oleh *working substance* dari mesin, yaitu material dalam mesin yang secara aktual melakukan kerja (e.g., campuran bensin-udara dalam mesin mobil).
  3. Sisa dari kalor input **heat** dibuang pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur input ke suatu tempat yang disebut *reservoir dingin*.

## Skema Mesin Kalor

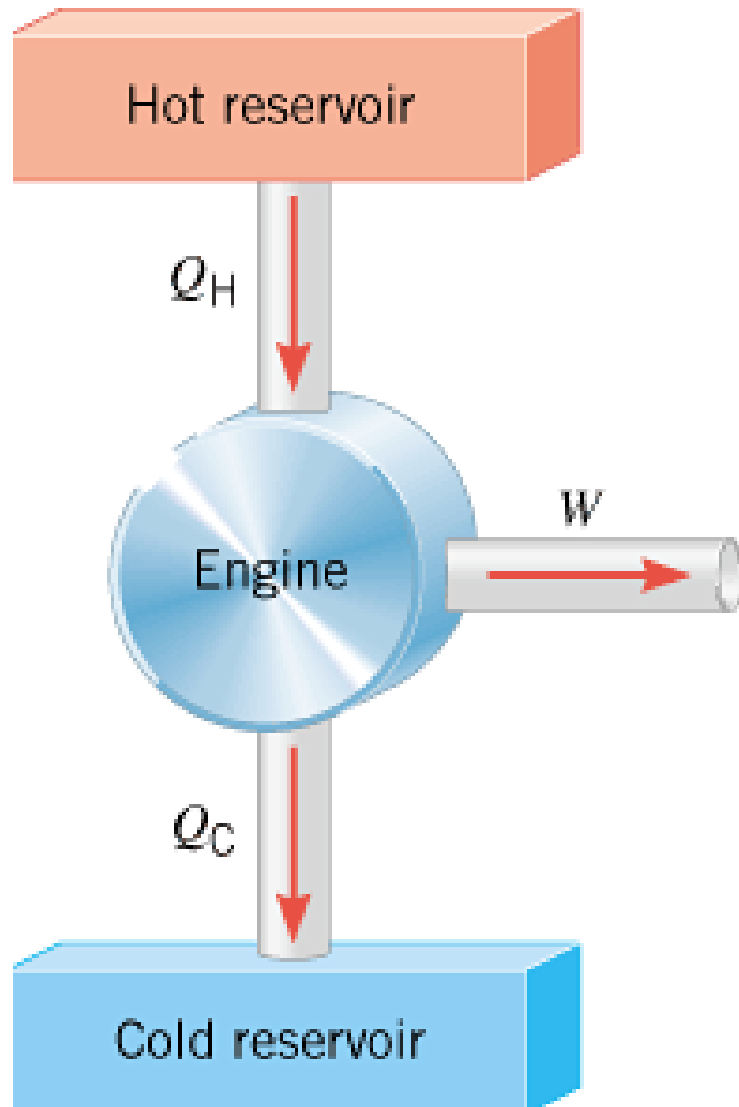


Gambar ini melukiskan skema mesin kalor.

$Q_H$  menyatakan besarnya input kalor, dan subscript H menyatakan hot reservoir.

$Q_C$  menyatakan besarnya kalor yang dibuang, dan subscript C merepresentasikan cold reservoir.

$W$  merepresentasikan kerja yang dilakukan.



Ketika sebuah sistem melakukan proses siklus maka tidak terjadi perubahan energi dalam pada sistem. Dari hukum I termodinamika:

$$\Delta U = Q - W$$

$$0 = Q - W$$

$$Q = W$$

$$Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$

$$W = Q = Q_H + Q_C$$

$$W = |Q_H| - |Q_C|$$

# Mesin Kalor ....

- Untuk menghasilkan efisiensi yang tinggi, sebuah mesin kalor harus menghasilkan jumlah kerja yang besar dan kalor input yang kecil. Karenanya, *efisiensi*,  $e$ , dari suatu mesin kalor didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja yang dilakukan oleh mesin  $W$  dengan kalor input  $Q_H$ :

$$e = \frac{\text{Kerja yg dilakukan}}{\text{Input panas}} = \frac{W}{Q_H} \quad (1)$$

- Jika kalor input semuanya dikonversikan menjadi kerja, maka mesin akan mempunyai *efisiensi* 1.00, karena  $W = Q_H$ ; dikatakan mesin ini memiliki *efisiensi* 100%, idealnya demikian. Tetapi hal tersebut tidak mungkin  $Q_C$  tidak sama dengan nol

# Mesin Kalor

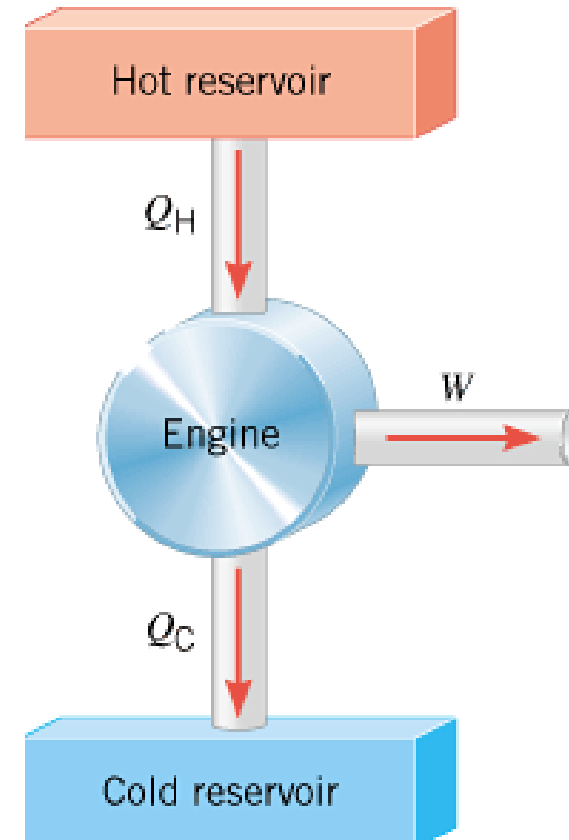
- Sebuah mesin, harus mengikuti prinsip konservasi energi. Sebagian dari kalor input  $Q_H$  diubah menjadi kerja  $W$ , dan sisanya  $Q_C$  dibuang ke cold reservoir. Jika tidak ada lagi kehilangan energi dalam mesin, maka prinsip konservasi energi:

$$Q_H = W + Q_C$$

$$W = Q_H - Q_C$$

$$e = \frac{W}{Q_H}$$

$$e = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$



## Contoh 1: An Automobile Engine

- Sebuah mesin mobil memiliki efisiensi 22.0% dan menghasilkan kerja sebesar 2510 J. Hitung jumlah kalor yang dibuang oleh mesin itu.
- Solusi

$$Q_C = Q_H - W = \frac{W}{e} - W = 2510J \left( \frac{1}{0.22} - 1 \right) = 8900J$$



# Proses mesin bakar

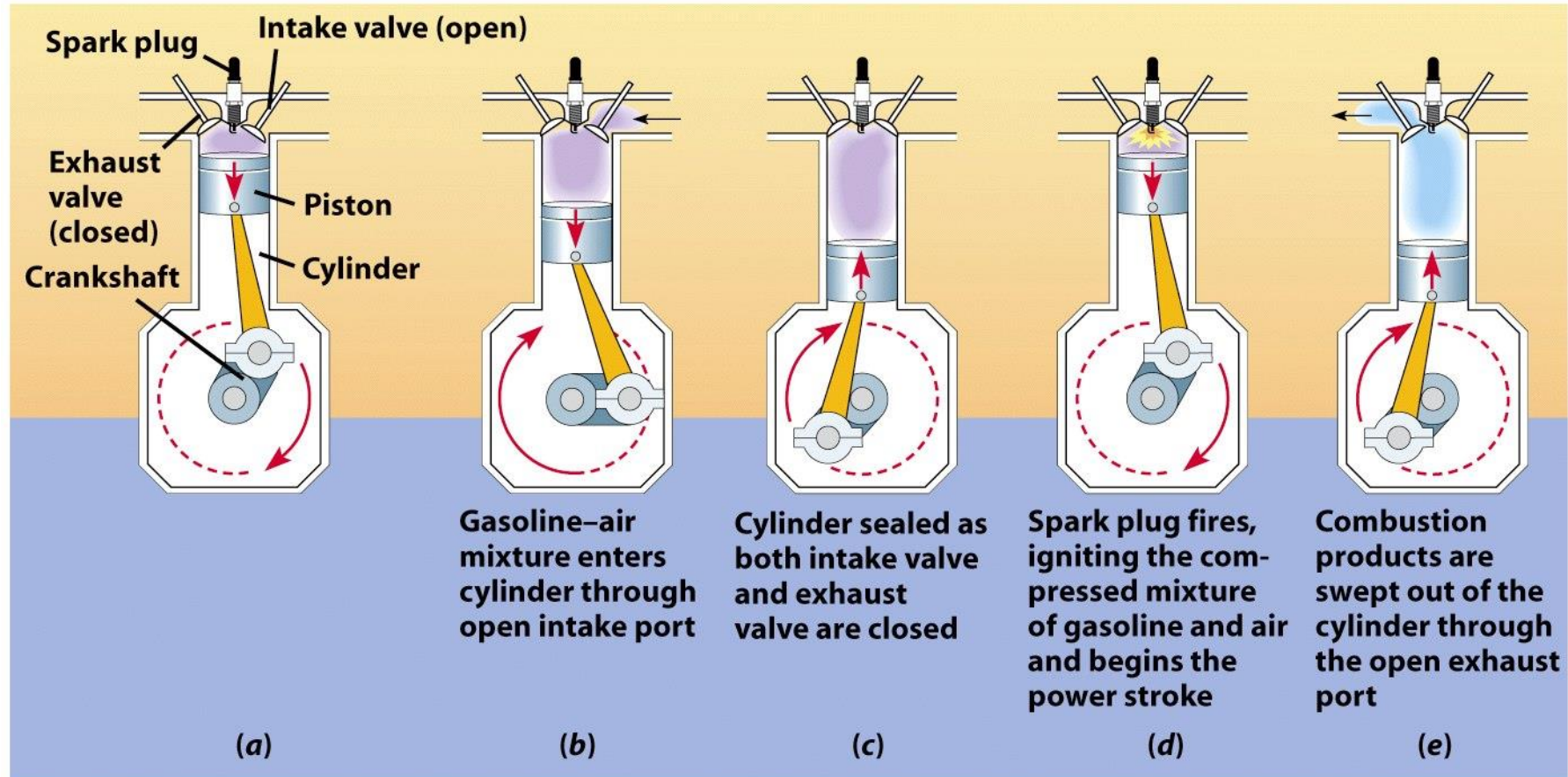


Figure 4-5 The Sciences: An Integrated Approach, 5/e  
© 2007 John Wiley & Sons

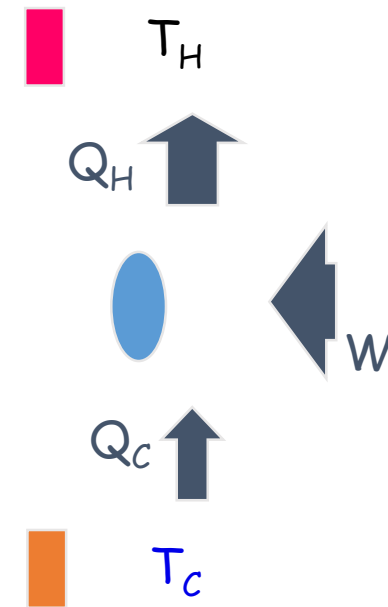
Pendingin (refrigerator): sebuah mesin kalor yang beroperasi secara terbalik. Refrigerator menarik panas dari tempat dingin (di dalam pendingin) dan melepaskan panas ke tempat yang lebih hangat.

$$Q_H + Q_C - W = 0$$

$$-Q_H = Q_C - W$$

$$|Q_H| = Q_C + |W|$$

REFRIGERATOR



$$|Q_H| > Q_C$$

$$|Q_H| = Q_C + |W|$$

Persamaan di atas merupakan hubungan nilai-mutlak yang berlaku untuk mesin kalor dan pendingin

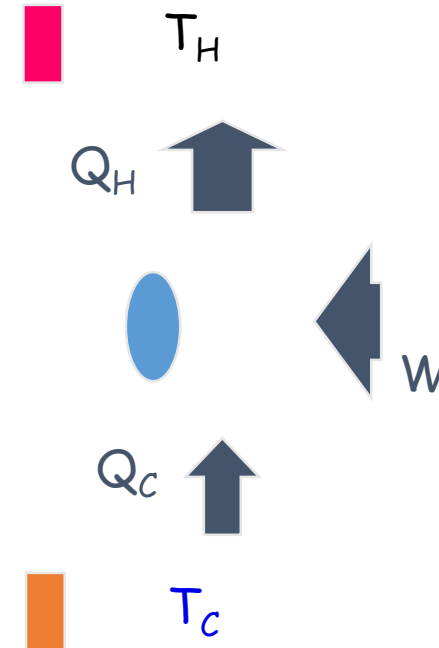
Siklus pendingin terbaik adalah yang memindahkan Kalor  $Q_C$  terbanyak dari dalam pendingin dengan Kerja mekanik  $W$  sedikit mungkin

$$\frac{|Q_C|}{|W|}$$

Semakin besar rasio ini maka semakin baik pendinginnya  
Rasio ini disebut koefisien kinerja (*coefficient of performance*)

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$

## REFRIGERATOR



# Prinsip Carnot dan Mesin Carnot

- Bagaimana membuat mesin kalor beroperasi dengan efisiensi maksimum?
- Insinyur Prancis Sadi Carnot (1796–1832) mengusulkan bahwa sebuah mesin kalor akan memiliki efisiensi maksimum jika proses-proses dalam mesin adalah reversibel (dapat balik).
- *Suatu proses reversibel adalah suatu keadaan dimana kedua sistem dan lingkungannya dapat kembali ke keadaan semula, sama persis seperti sebelum terjadinya proses.*
- Tujuan dari mesin kalor adalah perubahan panas menjadi kerja dengan efisiensi sebesar mungkin.
- Selama perpindahan panas dalam mesin Carnot tidak boleh ada perbedaan suhu yang cukup besar.

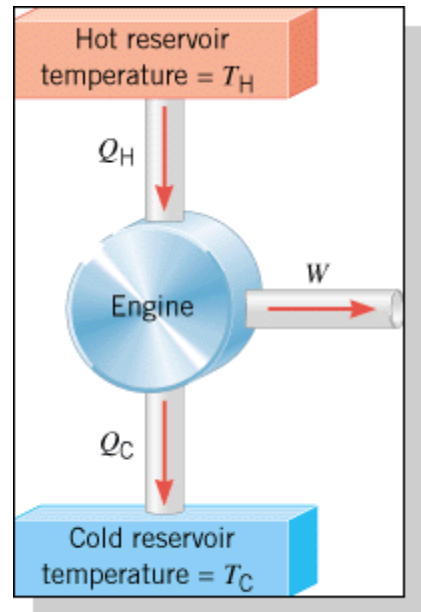
# Prinsip Carnot dan Mesin Carnot...

## **Prinsip Carnot : Sebuah alternatif pernyataan Hukum II Termodinamika**

Tidak ada mesin ireversibel yang beroperasi antara dua reservoir pada suhu konstan dapat mempunyai efisiensi yang lebih besar dari sebuah mesin reversibel yang beroperasi antara temperatur yang sama. Selanjutnya, semua mesin reversibel yang beroperasi antara temperatur yang sama memiliki efisiensi yang sama.

# Prinsip Carnot dan Mesin Carnot ...

Tidak ada mesin nyata yang beroperasi secara reversibel. Akan tetapi, ide mesin reversibel memberikan standard yang berguna untuk menilai performansi mesin nyata. Gambar ini menunjukkan sebuah mesin yang disebut, *Mesin Carnot*, yang secara khusus berguna sebagai model ideal.



Click on the image to start the simulation

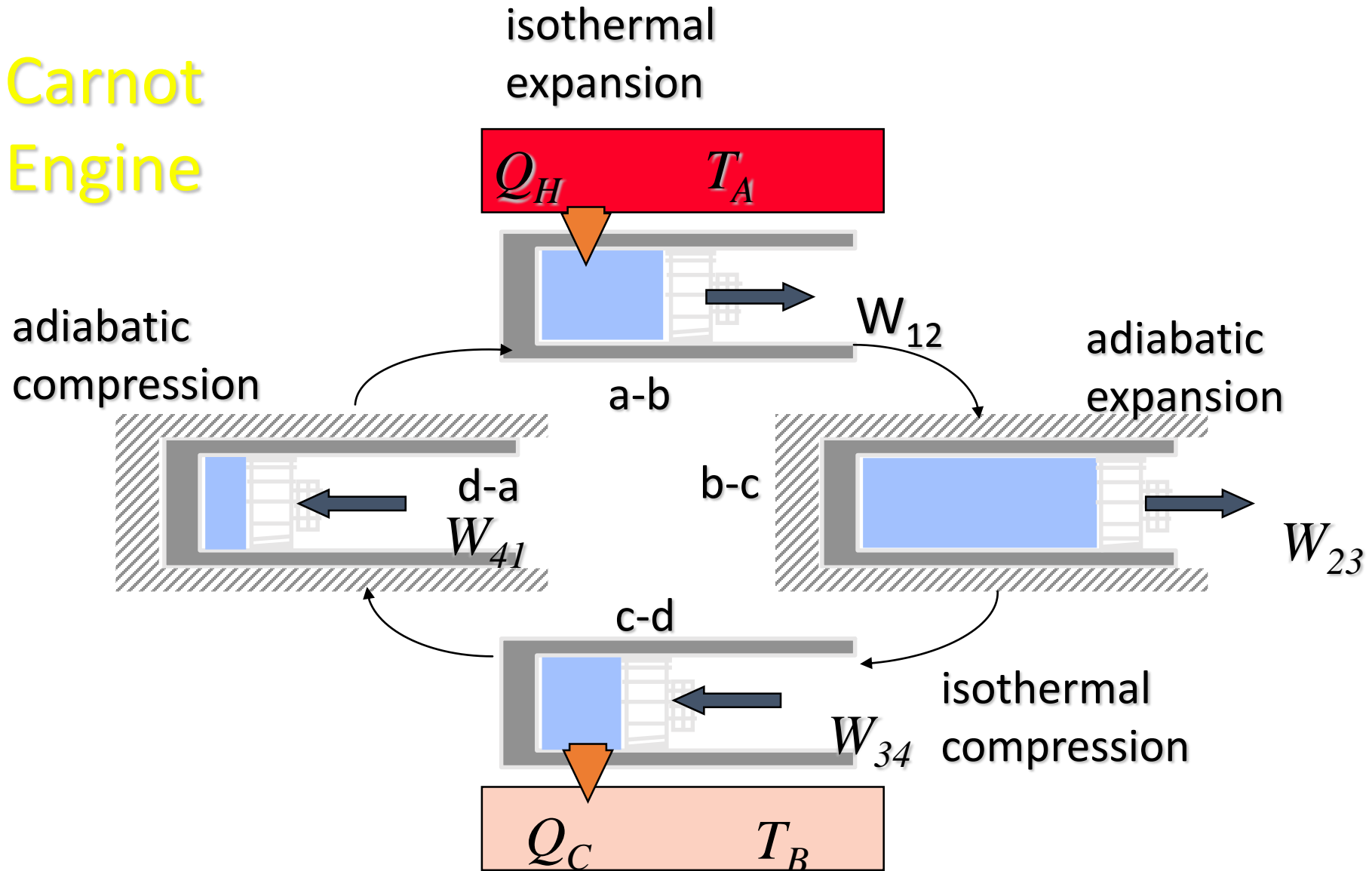
- Suatu sifat penting dari mesin Carnot adalah bahwa semua kalor input  $Q_H$  berasal dari suatu hot reservoir pada satu temperatur tunggal  $T_H$  dan semua kalor yang dibuang  $Q_C$  pergi menuju suatu cold reservoir pada satu temperatur tunggal  $T_C$ .

# Ciri-ciri siklus carnot

- Setiap proses yang melibatkan perpindahan panas haruslah isothermal baik pada  $T_H$  maupun pada  $T_C$ .
- Setiap proses yang mengalami perubahan suhu tidak terjadi perpindahan panas (proses adiabatik)
- Siklus carnot terdiri dari dua proses isothermal reversibel dan dua proses adiabatik reversibel

# Application of 2<sup>nd</sup> law to energy conversion systems

## Carnot Engine





# Application of 2<sup>nd</sup> law to energy conversion systems

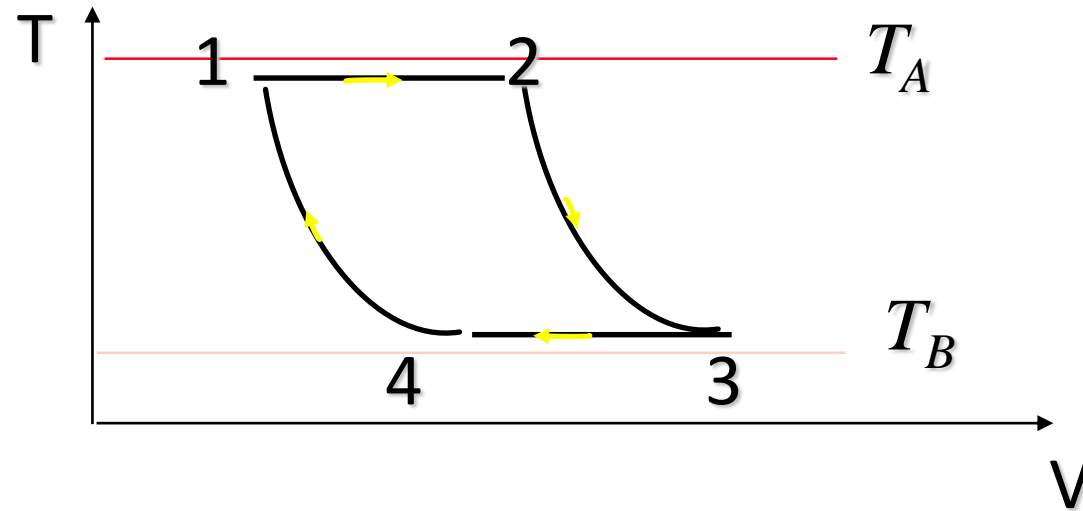
Carnot

Cycle

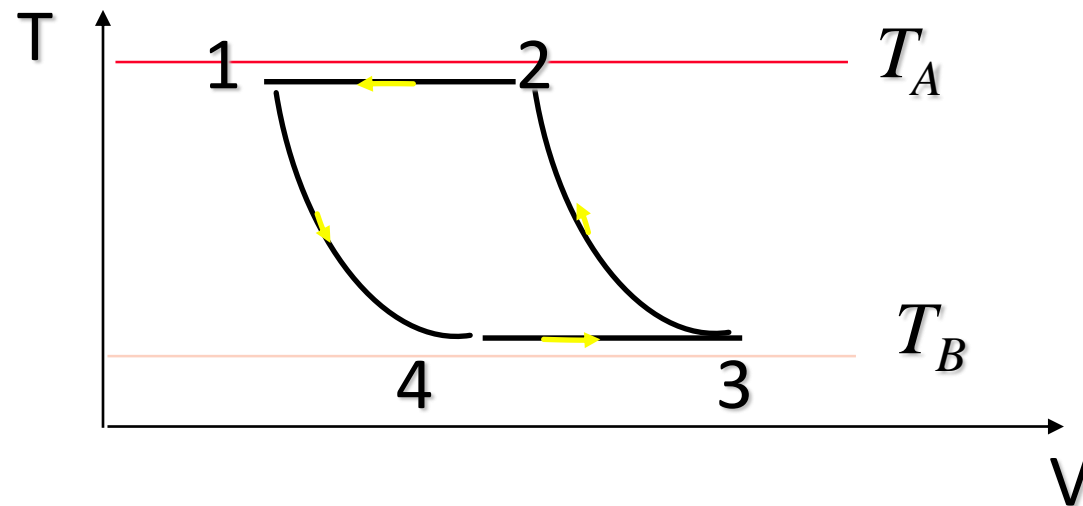
engine

reversible

heat engine



reversible  
heat pump



Untuk gas ideal energi dalam hanya bergantung pada suhu  
 maka pada proses isothermal perubahan energi dalam sama dengan nol

$$Q = W$$

Dari proses adiabatik

$$Q_H = W_{ab} = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a} \dots\dots\dots(1)$$

$$T_H V_b^{\gamma-1} = T_C V_c^{\gamma-1}$$

$$T_H V_a^{\gamma-1} = T_C V_d^{\gamma-1}$$

$$Q_C = W_{cd} = nRT_C \ln \frac{V_d}{V_c}$$

$$\frac{V_b^{\gamma-1}}{V_a^{\gamma-1}} = \frac{V_c^{\gamma-1}}{V_d^{\gamma-1}}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

$$Q_C = -nRT_C \ln \frac{V_c}{V_d} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{Q_C}{Q_H} = -\frac{T_C}{T_H}$$

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H}$$

Subtitusikan persamaan 1 dengan persamaan 2

$$\frac{Q_C}{Q_H} = -\left(\frac{T_C}{T_H}\right) \frac{\ln(V_c/V_d)}{\ln(V_b/V_a)} \dots\dots\dots(3)$$

$$e = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Hubungan ini memberikan nilai efisiensi maksimum yang mungkin dari suatu mesin kalor yang beroperasi antara  $T_C$  dan  $T_H$

# Pendingin carnot

Karena masing-masing langkah dalam siklus carnot adalah reversibel, maka seluruh siklus dapat dibalik, hal ini mengubah mesin menjadi pendingin

$$K = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$

$$K_{carnot} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

$$K = \frac{|Q_C|/|Q_H|}{1 - |Q_C|/|Q_H|}$$

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H}$$

Semakin besar perbedaan suhu  $T_H - T_C$  semakin kecil harga K dan semakin besar kerja yang diperlukan untuk memindahkan jumlah panas yang dibutuhkan

# Prinsip Carnot dan Mesin Carnot ...

- Untuk mesin Carnot, perbandingan antara kalor yang dibuang  $Q_C$  dengan kalor input  $Q_H$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$$

dengan  $T_C$  dan  $T_H$  dalam kelvin.

- Efisiensi mesin Carnot dapat dituliskan sebagai berikut:

$$e = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Hubungan ini memberikan nilai efisiensi maksimum yang mungkin dari suatu mesin kalor yang beroperasi antara  $T_C$  dan  $T_H$ .

# Entropy and the 2<sup>nd</sup> Law

Qualitative statements:

**Clausius:** “It is impossible to convert heat completely to work”

**Kelvin – Planck:** “It is impossible for any any engine to transfer heat from a cold source to a hot source without work being done”

By analyzing many experiments and processes involving transfer of heat, **Clausius** (ca 1850) uncovers a new thermodynamic property, which he names **entropy**

- related to the heat exchanged between system and surroundings
- not related to work
- places 2<sup>nd</sup> law in quantitative form

# Entropi dan Ketidakteraturan

- Redistribusi partikel gas dalam wadah terjadi tanpa perubahan energi dalam total sistem, semua susunan ekuivalen
- Jumlah cara komponen sistem dapat disusun tanpa merubah energi sistem terkait erat dengan kuantitas entropi ( $S$ )
- Entropi adalah ukuran ketidakteraturan sistem
- Sistem dengan cara tersusun ekuivalen komponennya sedikit seperti kristal padat memiliki ketidakteraturan yang kecil atau entropi rendah
- Sistem dengan cara tersusun ekuivalen komponennya banyak seperti gas memiliki ketidakteraturan besar atau entropi tinggi

- Jika entropi sistem meningkat, komponen sistem menjadi semakin tidak teratur, random dan energi sistem lebih terdistribusi pada range lebih besar  
 $S_{\text{disorder}} > S_{\text{order}}$
- Seperti halnya energi dalam atau entalpi, entropi juga fungsi keadaan yaitu hanya tergantung pada keadaan awal dan akhir tidak pada bagaimana proses terjadinya

$$\Delta S_{\text{sis}} = S_{\text{final}} - S_{\text{initial}}$$

- Jika entropi meningkat maka  $\Delta S_{\text{sis}}$  akan positif, sebaliknya jika entropi turun, maka  $\Delta S_{\text{sis}}$  akan negatif

# Entropi dan Hukum Kedua Termodinamika

- Apa yang menentukan arah perubahan spontan?
- Sistem alami cenderung ke arah tidak teratur, random, distribusi partikel kurang teratur
- Beberapa sistem cenderung lebih tidak teratur (es meleleh) tetapi ada juga yang lebih teratur (air membeku) secara spontan
- Dengan meninjau sistem dan lingkungan terlihat semua proses yang berlangsung dalam arah spontan akan meningkatkan entropi total alam semesta (sistem dan lingkungan). Ini yang disebut dengan hukum kedua termodinamika
- Hukum ini tidak memberikan batasan perubahan entropi sistem atau lingkungan, tetapi untuk perubahan spontan entropi total sistem dan lingkungan harus positif

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{surr}} > 0$$



# Application of 2<sup>nd</sup> law to energy conversion systems

$$\Delta S_A = \frac{-Q_A}{T_A}$$

$$\Delta S_B = \frac{Q_B}{T_B}$$

for a cycle no change in CV so:

$$S_G = \left( \frac{Q_B}{T_B} - \frac{Q_A}{T_A} \right) \geq 0$$

for a reversible process:

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{T_B}{T_A}$$

for an irreversible process:

$$\frac{Q_B}{Q_A} > \frac{T_B}{T_A}$$

# Efficiency of a Carnot engine

apply 1<sup>st</sup> law for this cycle:

$$W = Q_A - Q_B$$

then energy conversion efficiency is:

$$\eta = \frac{\text{useful work}}{\text{heat input}} = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A}$$

for a reversible process:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_A - T_B}{T_A} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

# Efficiency of an irreversible engine

$$s_G = \left( \frac{Q_B}{T_B} - \frac{Q_A}{T_A} \right) \geq 0$$

for an irreversible process:

$$\frac{Q_B}{Q_A} > \frac{T_B}{T_A}$$

$$\eta_{irrev} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} < 1 - \frac{T_B}{T_A} = \eta_{Carnot}$$

# 2<sup>nd</sup> law - other formulations

- Kelvin-Planck statement:

“continuously operating 1T engine is impossible”

- Clausius statement:

“a zero-work heat pump is impossible”

# Pressure

thermodynamic = mechanical

$$\underbrace{\delta S_G}_{\text{entropy generation}} = \underbrace{dS}_{\text{change in entropy storage}} - \underbrace{\frac{\delta Q}{T}}_{\text{entropy inflow}}$$

Gibbs:

$$dS = \frac{1}{T} dU + \frac{P}{T} dV$$

1st law:

$$\delta Q + \delta W = dU$$

compression:

$$\delta W = -P_m dV$$

$$\delta S_G = \left( \frac{P - P_m}{T} \right) dV$$

$$\delta S_G = 0$$

for a reversible process

$$P = P_m$$

for an equilibrium state

## Entropy for ideal gasses

$$S = N\bar{s}(T, P)$$

- GENERALLY:
- where N is the number of moles

$$S = N \left( \bar{s}^\circ(T) - R_u \ln \frac{P}{P^\circ} \right)$$

$$P^\circ$$

$$\bar{s}^\circ(T) = \bar{s}(T, P^\circ)$$

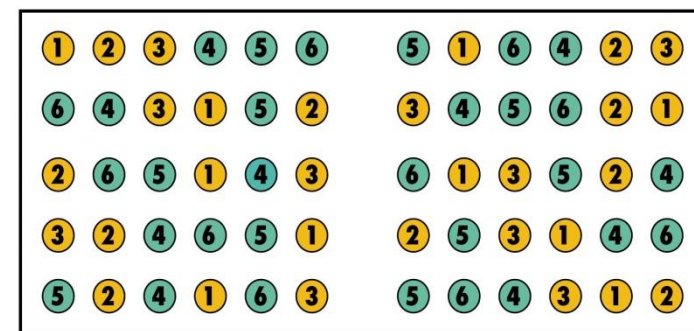
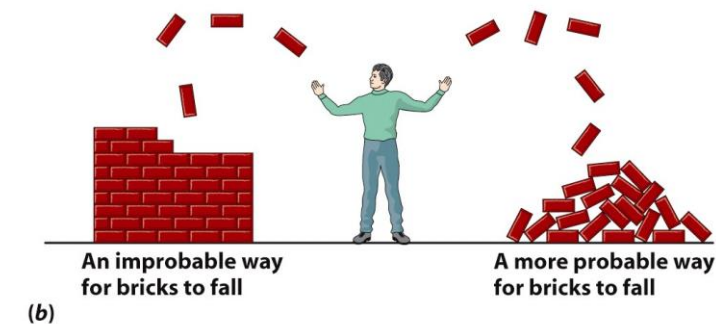
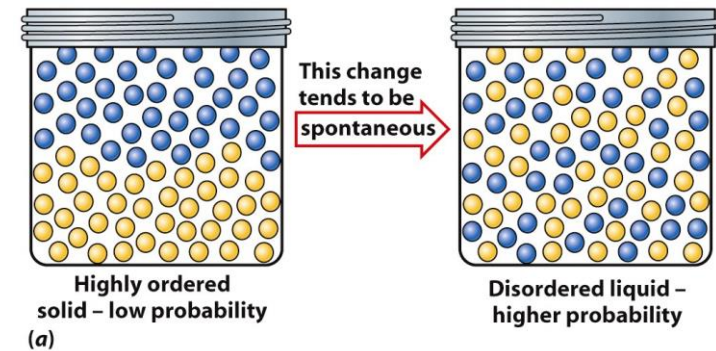
- FOR IDEAL GASSES:
  - Standard Pressure (1atm)
  - Standard Pressure entropy

FOR IDEAL GASSES with  $C_p, C_v = \text{const}$ :

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= N \left( \bar{C}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \right) = \\ &= N \left( \bar{C}_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_u \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \end{aligned}$$

# Setiap sistem terisolasi akan makin acak

- Sistem teratur
  - Ada pola yang teratur dan dapat diramalkan perkembangannya
- Sistem tak teratur
  - Kebanyakan atom-atomnya bergerak acak
- Entropi
  - Ukuran bagi taraf keacakan
  - Entropi sistem terisolasi hanya dapat tetap, atau meningkat



# Entropi:

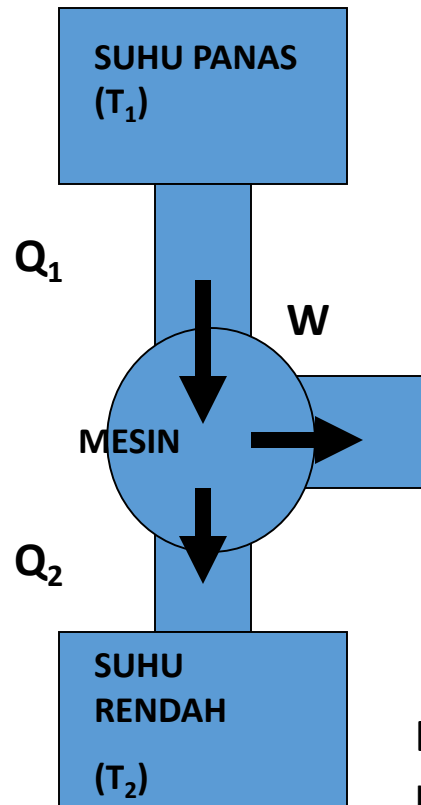
- Diusulkan istilahnya oleh Clausius, “dari kata ‘transformasi’ dalam bahasa Yunani, dimiripkan dengan istilah ‘energi’ yang erat kaitannya”.
- Dikukuhkan Ludwig Eduard Boltzmann (1844 – 1906) dengan konsep “zat terdiri atas partikel kecil yang bergerak acak” dan teori peluang:

Suatu sistem condong berkembang ke arah keadaan yang berpeluang lebih besar;

$$S = k_B \ln \Omega$$



# EFFISIENSI MESIN



- Mesin menyerap sejumlah kalor  $Q_1$  dari sumber panas.
- Melakukan usaha mekanik  $W$
- Membuang sisa kalor  $Q_2$  ke sumber dingin
- Mesin bekerja dalam siklus, maka perubahan energi dalamnya sama dengan nol ( $\Delta U=0$ ). Sehingga Hukum I termodinamika  $W = \Delta Q$   
 $\Delta Q = Q_1 - Q_2$  ; maka  $W = Q_1 - Q_2$

Effisiensi termal sebuah mesin adalah nilai perbandingan antara usaha yang dilakukan dan kalor yang diserap dari sumber suhu tinggi selama satu siklus

# Perhitungan Effisiensi

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

*$Q \sim T$ , maka*

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

# Latihan #1

Compute the maximum possible efficiency of a heat engine operating between the temperature limits of  $100^{\circ}\text{C}$  and  $400^{\circ}\text{C}$ .

# Latihan #2

In a cycle of Heat Engine, the temperature of the reservoir (which supplies heat) is  $127^{\circ}\text{C}$  and the temperature of the condenser is  $27^{\circ}\text{C}$ . The heat which is taken by the engine per cycle is  $60\text{ J}$ . Calculate :

- a. The heat which the engine releases
- b. The work which the engine does
- c. Efficiency of the engine

# Latihan #3

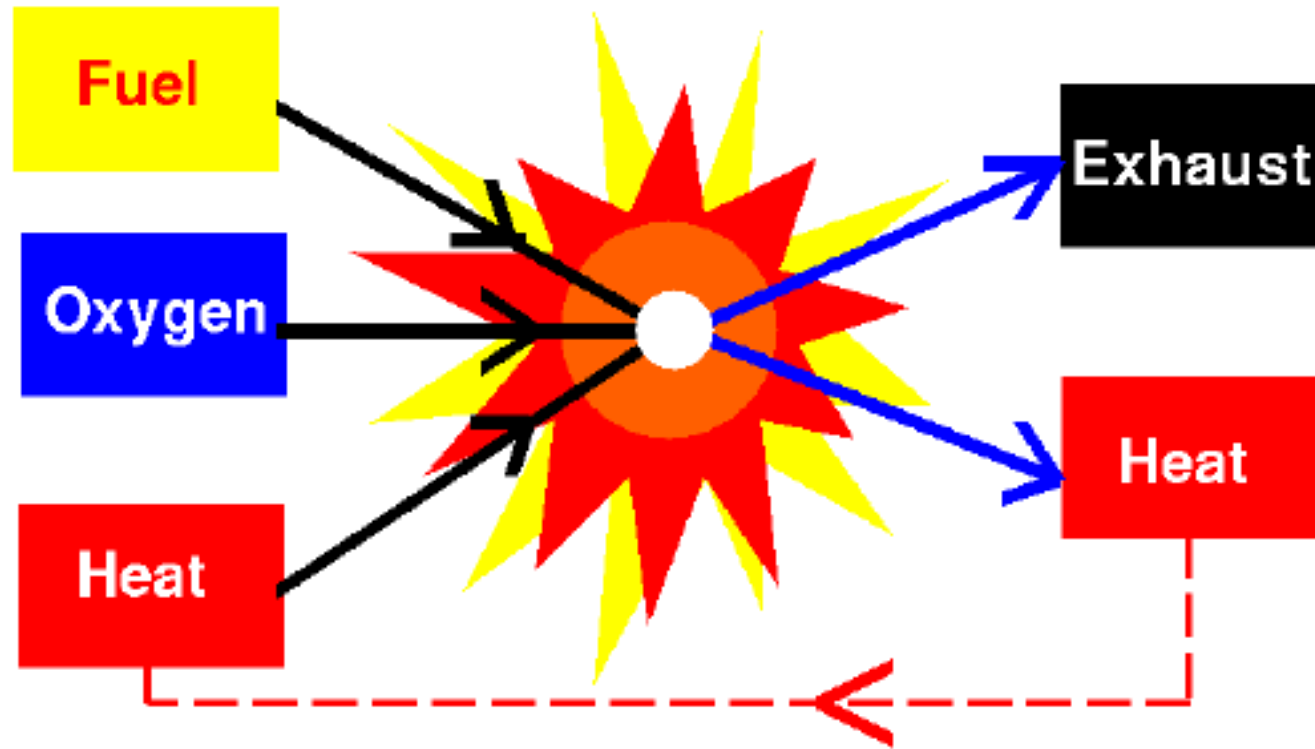
The heat engine has efficiency of 50% when the temperature of its low reservoir is  $27^{\circ}\text{C}$ . What temperature increase is needed by the high reservoir in order to increase the efficiency of the engine to 60%

# Latihan #4

The heat engine takes 9220J of heat energy from the high reservoir and does the work of 1750 J per cycle. The engine work between temperature of 689°C and 397°C. What is its efficiency ?

# COMBUSTION

---



# ***Motor Pembakaran Dalam***

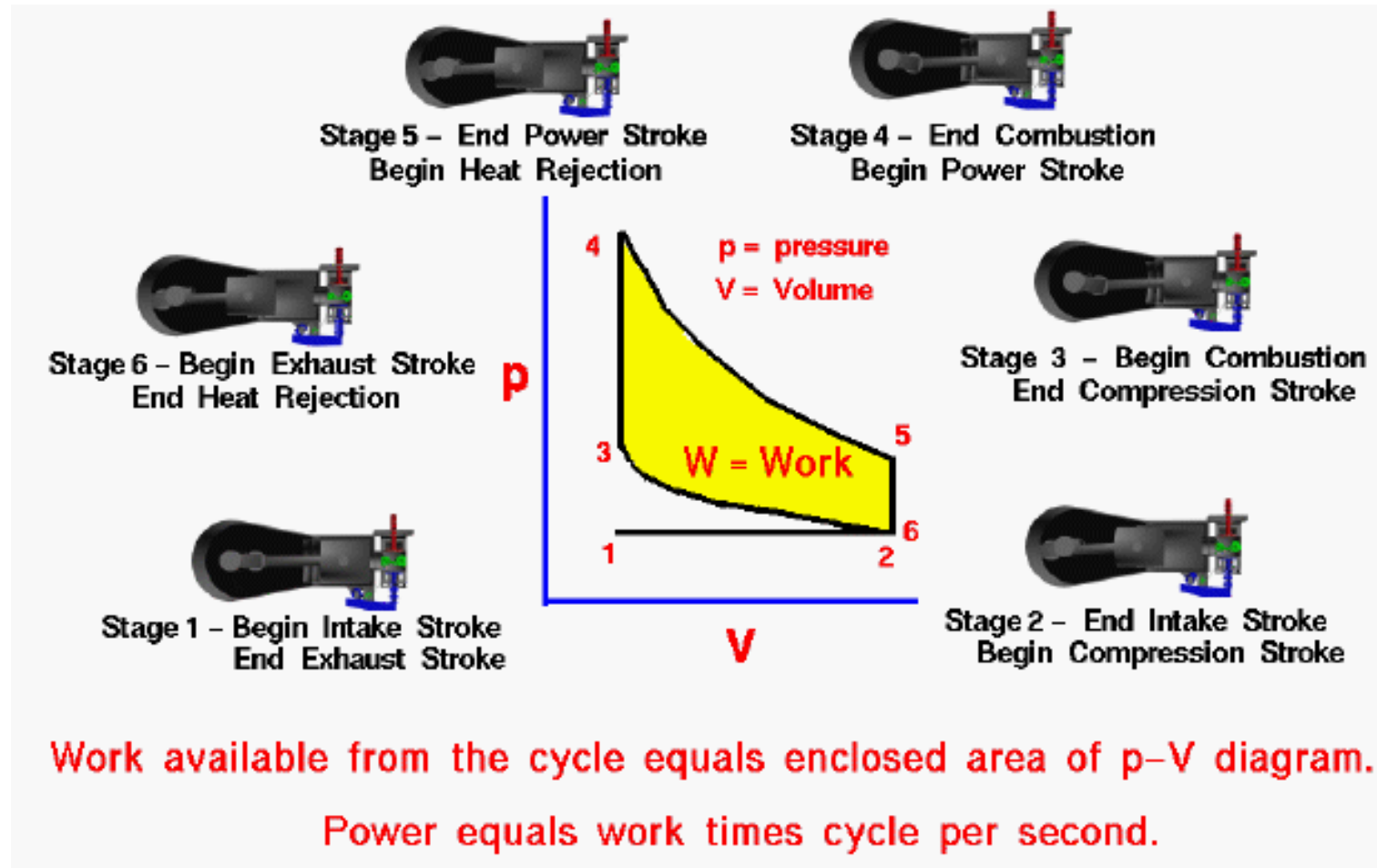
Berdasarkan sistem pembakarannya:

- Motor Bakar SI (Spark Ignition)
- Siklus Otto
- Bahan bakar : Bensin
- ❖ Motor Bakar CI (Compression Ignition)
- ❖ Siklus Diesel
- ❖ Bahan Bakar: Solar

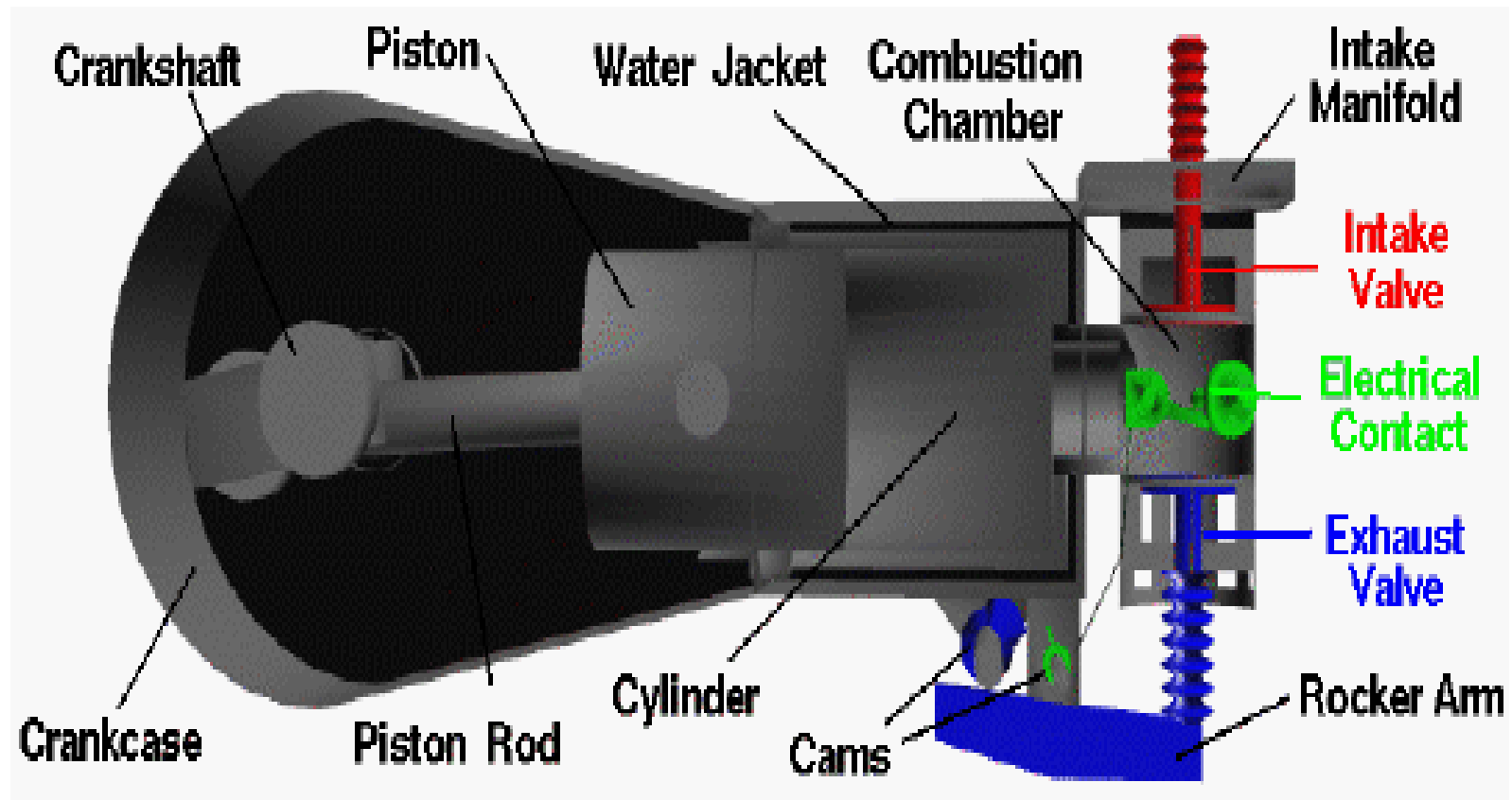


# *Internal Combustion Engine*

## (Ideal Otto Cycle)



# PARTS OF ENGINE



## ***Sistem Turbin Gas***

- Sistem turbin gas terbuka: bahan bakar bercampur dengan udara dan keluar sebagai gas hasil pembakaran. Bahan bakar harus bersih supaya tidak korosi
- Sistem turbin gas tertutup: bahan bakar tidak ikut dalam fluida kerja. Fluida kerja adalah udara murni atau gas murni yang sudah bersih. Fluida kerja didinginkan sebelum dipergunakan kembali.

# ***Aplikasi Turbin Gas***

- Penggerak sistem Propulsi (pesawat terbang, kapal laut)
- Pembangkit tenaga listrik
- Penyedia panas di industri

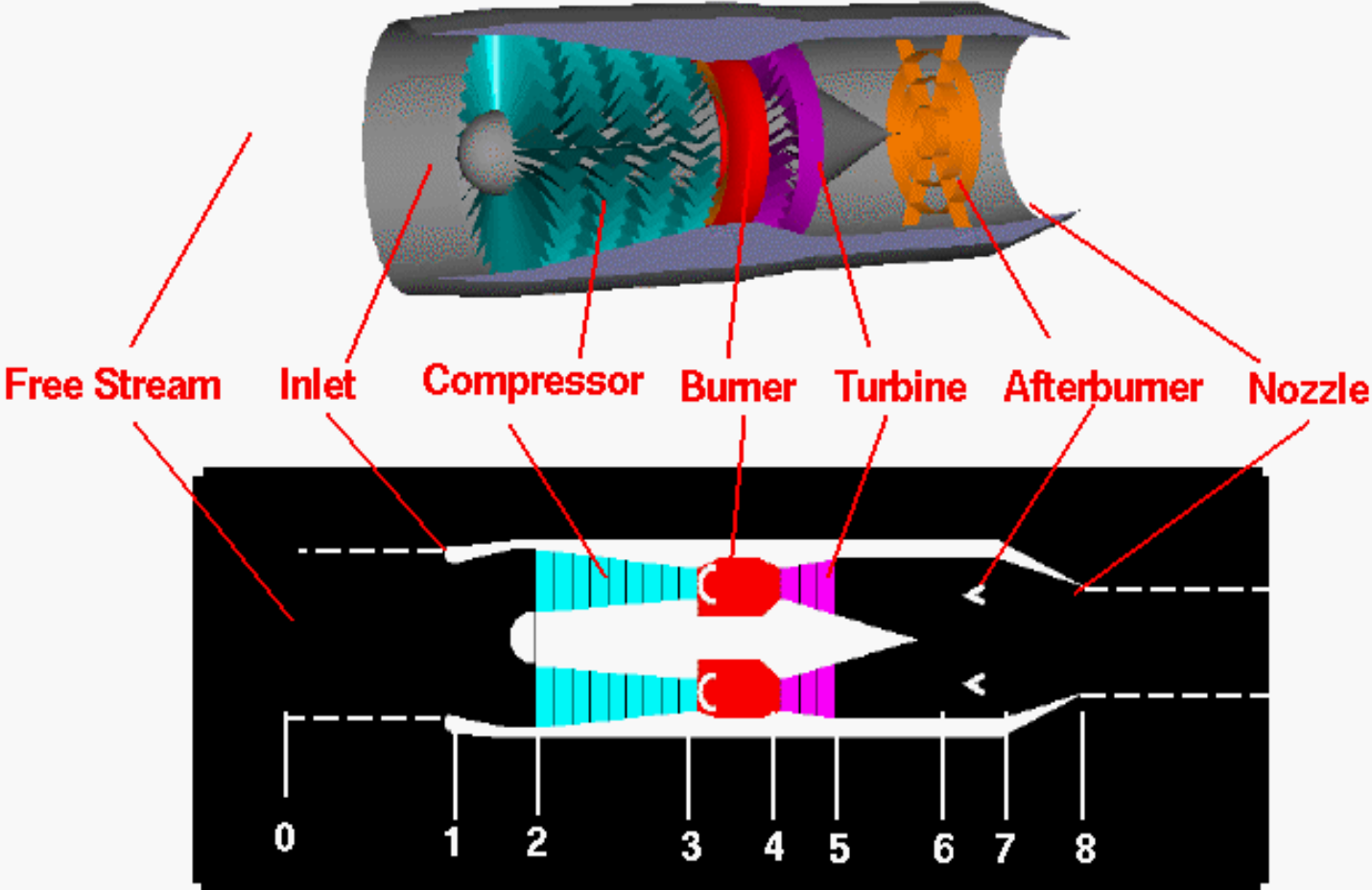
Dibandingkan dengan motor bakar, turbin gas:

Penghasil daya yang lebih besar

konsumsi bahan bakar yang lebih boros

berat dan ukuran yang jauh lebih kecil

# Gas Turbine Schematic



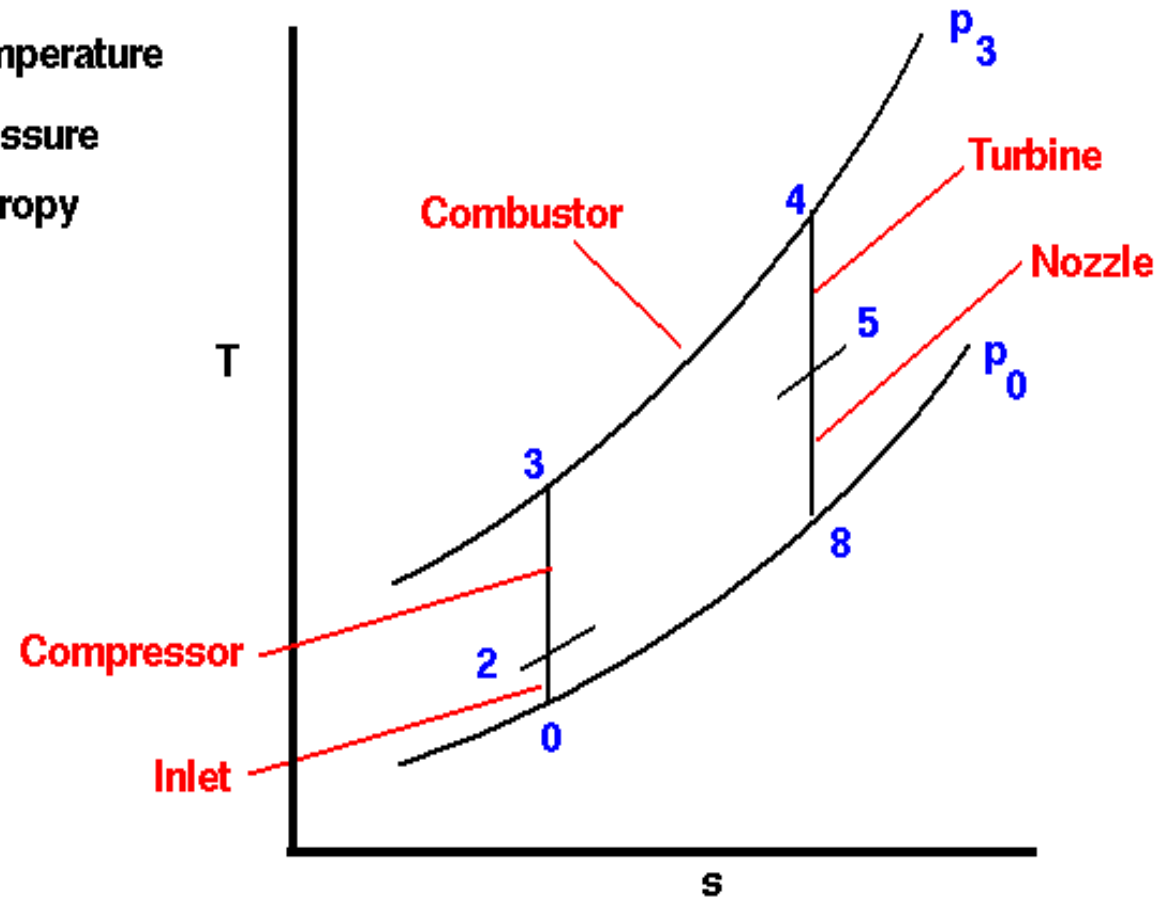
# *Siklus Turbin Gas: Ideal Brayton Cycle*

(T-s diagram)

T = Temperature

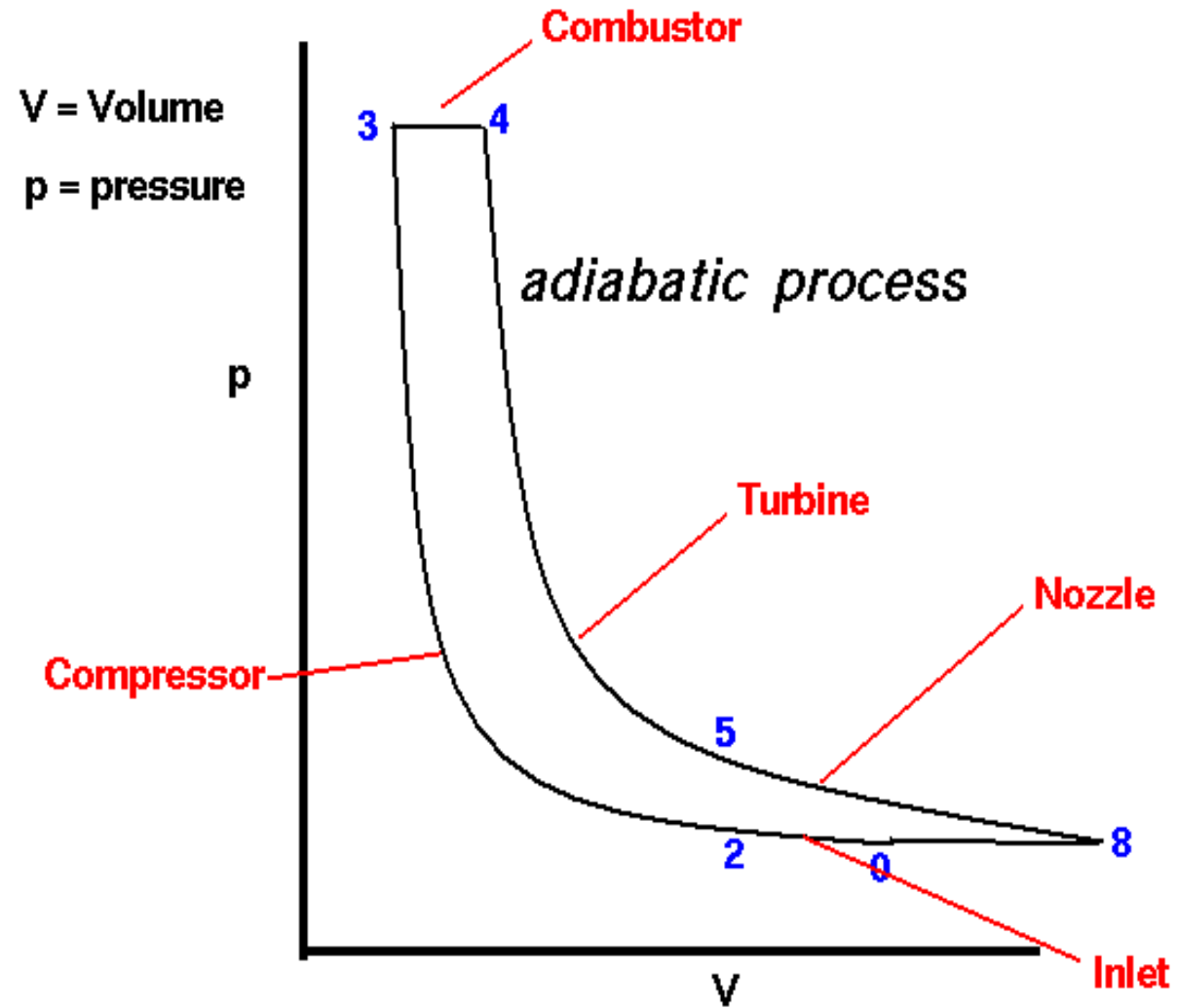
p = pressure

s = entropy

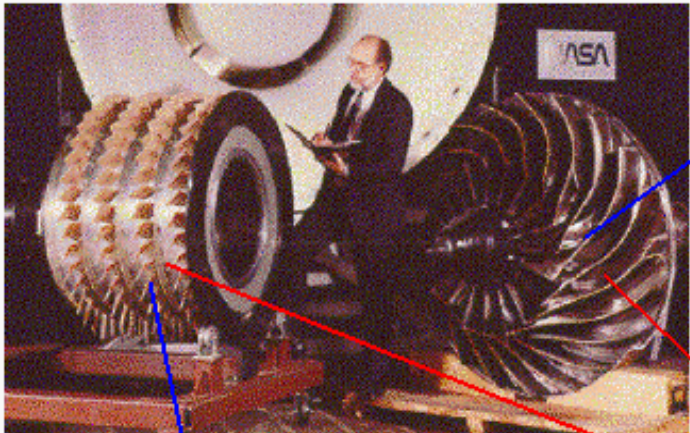


# Ideal Brayton Cycle

## p-V diagram



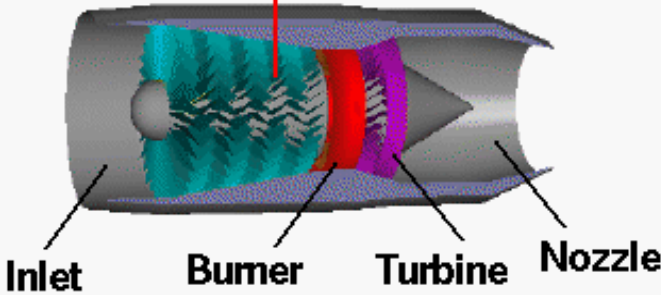
# Compressors



Centrifugal Compressor

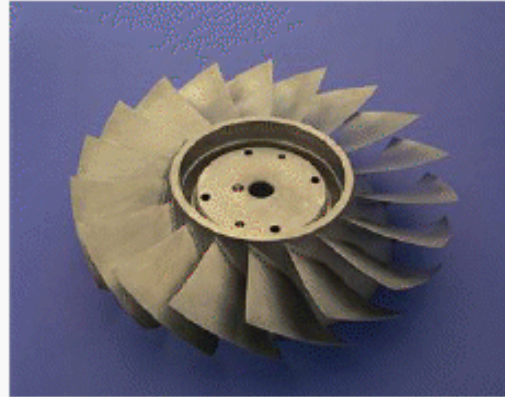
Axial Compressor  
(only rotor shown)

Compressor

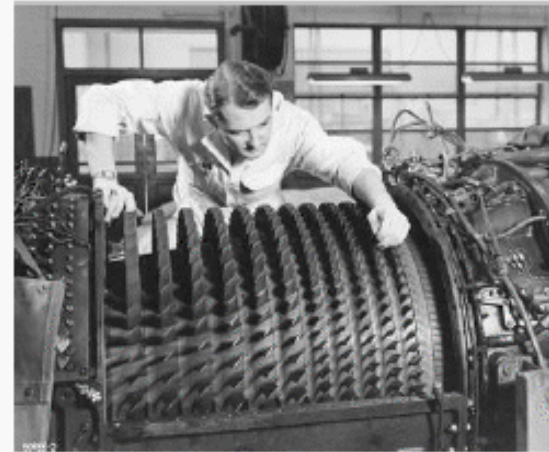
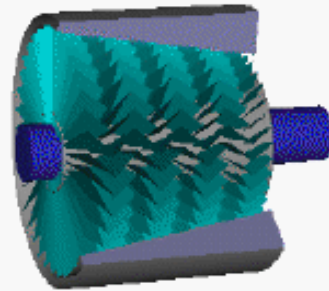




# *Axial Compressor*

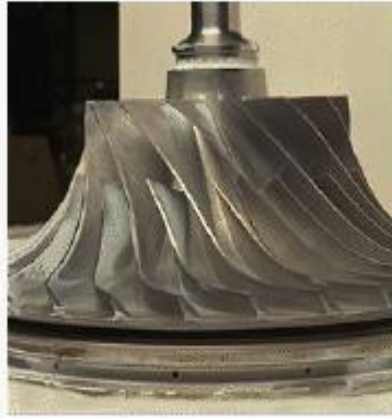


**Single Rotor**



**Multistage Compressor  
(only rotors shown)**

# Centrifugal Compressor



**Side View**



# Compressor Thermodynamics

pt = total pressure

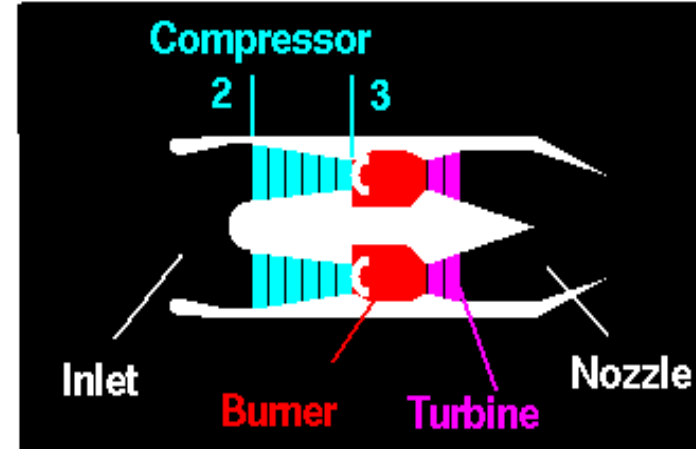
Tt = total temperature

ht = specific stagnation enthalpy

$c_p$  = specific heat

$\gamma$  = specific heat ratio

$\eta_c$  = adiabatic efficiency



Compressor Pressure Ratio CPR

$$\text{CPR} = \frac{pt_3}{pt_2} = \left( \frac{Tt_3}{Tt_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

station 2 - compressor entrance  
station 3 - compressor exit

Compressor Work / mass = CW

$$\text{CW} = (ht_3 - ht_2)$$

$$\text{CW} = c_p (Tt_3 - Tt_2)$$

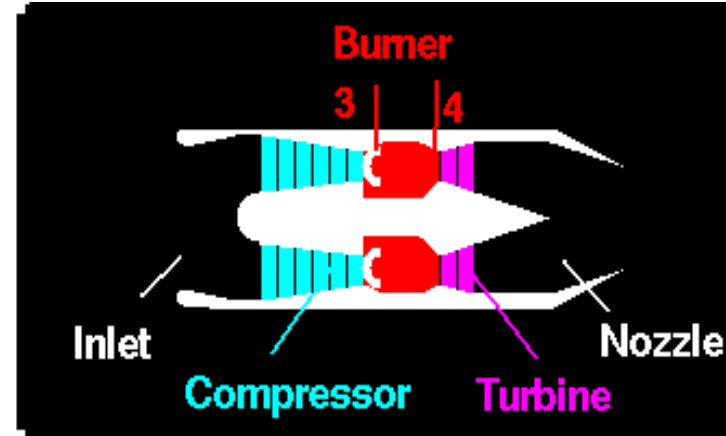
$$\text{CW} = \frac{c_p Tt_2}{\eta_c} (\text{CPR}^{(\gamma-1)/\gamma} - 1)$$

# Burner Thermodynamics

$pt$  = total pressure  
 $Tt$  = total temperature  
 $ht$  = specific stagnation enthalpy  
 $c_p$  = specific heat (average)  
 $f$  = fuel/air mass flow ratio  
 $Q$  = fuel heating value  
 $\eta_b$  = adiabatic efficiency

Burner Pressure Ratio = BPR

$$BPR = \frac{pt_4}{pt_3} \sim 1.0$$



station 3 – burner entrance  
station 4 – burner exit

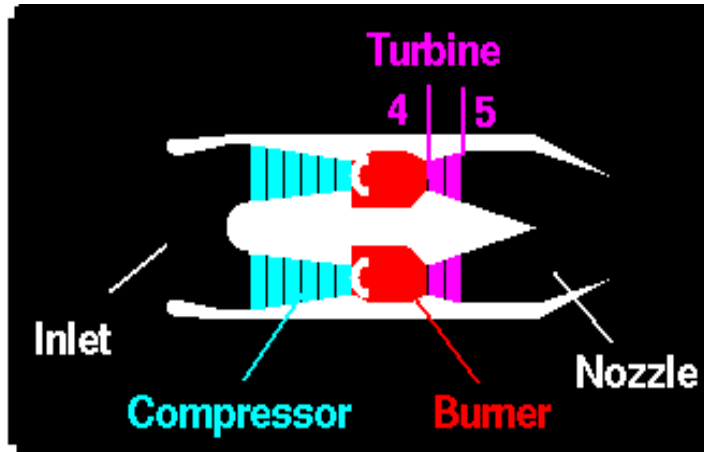
Burner Energy Equation

$$(1+f)ht_4 = ht_3 + f\eta_b Q$$
$$(1+f)c_p Tt_4 = c_p Tt_3 + f\eta_b Q$$

$$\frac{Tt_4}{Tt_3} = \frac{1 + f\eta_b Q / c_p Tt_3}{1 + f}$$

# Turbine Thermodynamics

$pt$  = total pressure  
 $Tt$  = total temperature  
 $ht$  = specific stagnation enthalpy  
 $c_p$  = specific heat  
 $\gamma$  = specific heat ratio  
 $\eta_t$  = adiabatic efficiency



station 4 - turbine entrance  
station 5 - turbine exit

Turbine Pressure Ratio = TPR

$$TPR = \frac{pt_5}{pt_4} = \left( \frac{Tt_5}{Tt_4} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Turbine Work / mass = TW

$$TW = (ht_4 - ht_5)$$

$$TW = c_p (Tt_4 - Tt_5)$$

$$TW = \eta_t c_p Tt_4 (1 - TPR^{(\gamma-1)/\gamma})$$

# Compressor-Turbine Matching

$p_t$  = total pressure

$T_t$  = total temperature

$c_p$  = specific heat

$\gamma$  = specific heat ratio

$\eta$  = adiabatic efficiency

2 - compressor entrance

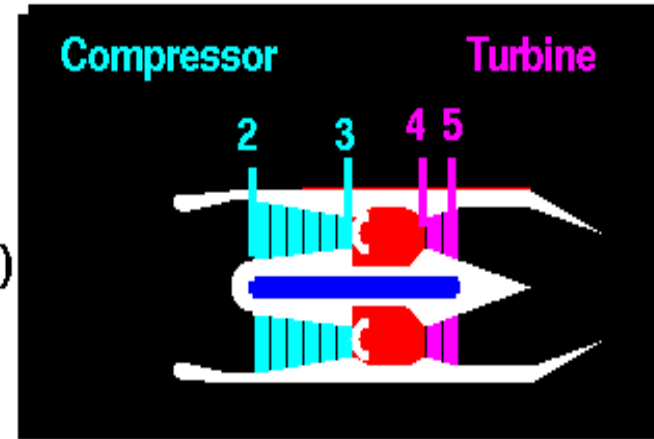
3 - compressor exit

4 - turbine entrance

5 - turbine exit

CPR = Compressor Pressure Ratio ( $p_{t3}/p_{t2}$ )

TPR = Turbine Pressure Ratio ( $p_{t5}/p_{t4}$ )



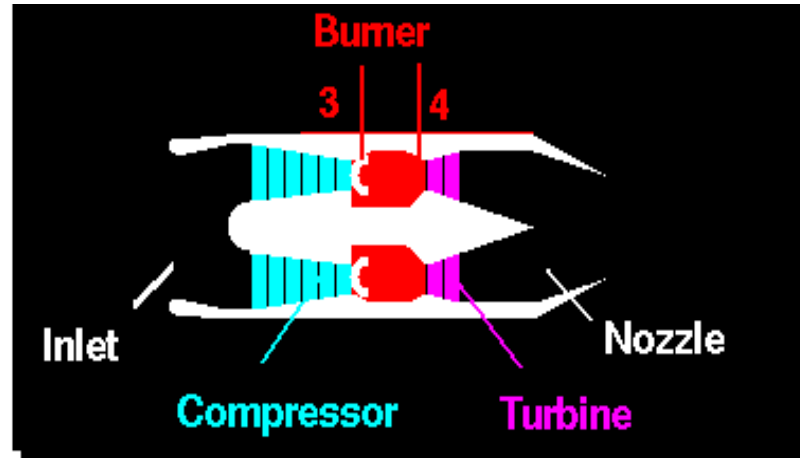
Compressor Work / mass =  $CW = TW =$  Turbine Work / mass

$$\frac{c_p T_{t2}}{\eta_c} (\text{CPR}^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) = \eta_t c_p T_{t4} (1 - \text{TPR}^{(\gamma-1)/\gamma})$$

$$\text{TPR}^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 - \frac{T_{t2}}{\eta_c \eta_t T_{t4}} (\text{CPR}^{(\gamma-1)/\gamma} - 1)$$

# Fuel Mass Flow Rate (Fuel/Air Ratio)

- $\dot{m}_f$  = fuel mass flow rate
- $\dot{m}_a$  = air mass flow rate
- $f$  = fuel to air ratio ( $\dot{m}_f / \dot{m}_a$ )
- $Tt$  = total temperature
- $c_p$  = specific heat (average)
- $Q$  = fuel heating value
- $\eta_b$  = adiabatic efficiency



station 3 – burner entrance  
station 4 – burner exit

Bumer Temperature Ratio: 
$$\frac{Tt_4}{Tt_3} = \frac{1 + f \eta_b Q / c_p Tt_3}{1 + f}$$

$$f = \frac{(Tt_4/Tt_3) - 1}{\eta_b Q / c_p Tt_3 - (Tt_4/Tt_3)}$$

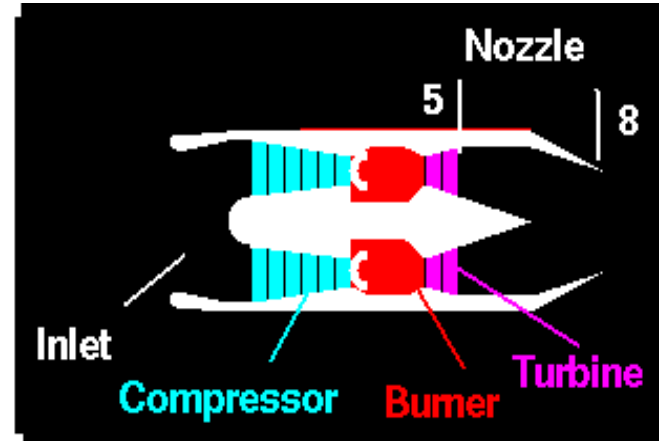
$$\dot{m}_f = f \dot{m}_a$$

# Turbine Nozzle Performance

- $p$  = pressure
- $T$  = temperature
- $h$  = specific enthalpy
- $V$  = velocity
- $c_p$  = specific heat
- $\gamma$  = specific heat ratio
- $\eta_n$  = adiabatic nozzle efficiency
- NPR = nozzle pressure ratio =  $p_{t8}/p_8$

## Nozzle Total Temperature & Pressure

$$\frac{p_{t8}}{p_{t5}} = \left( \frac{T_{t8}}{T_{t5}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 1$$



station 5 – turbine exit  
station 8 – nozzle throat

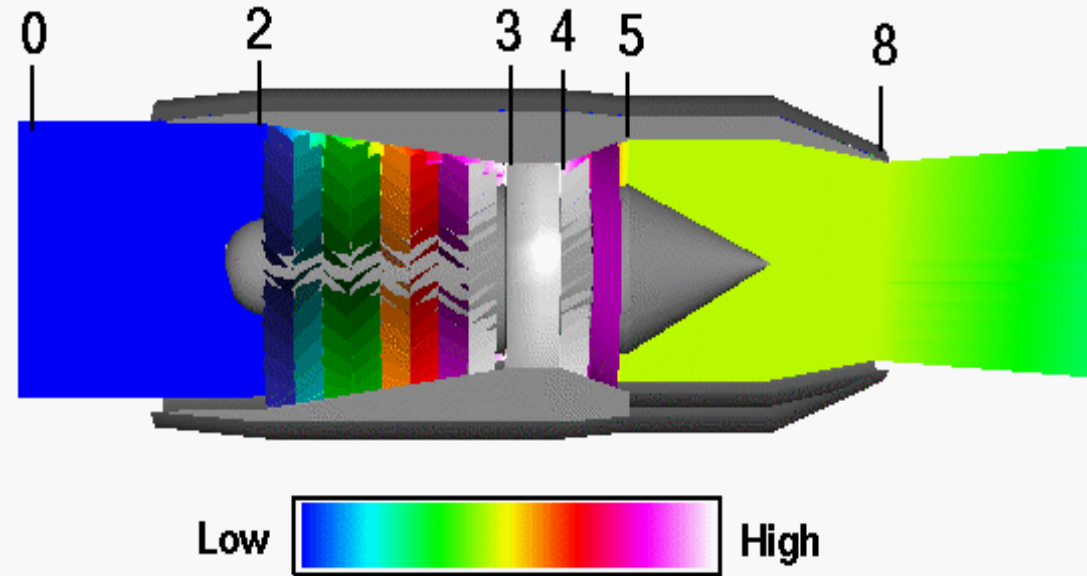
## Nozzle Energy Equation

$$h = c_p T \quad h_{t8} = h_8 + \frac{V_8^2}{2 \eta_n}$$

$$V_e = V_8 = \sqrt{2 c_p T_{t8} \eta_n [1 - \{1 / \text{NPR}\}^{(\gamma-1) / \gamma}]}$$



# Pressure Variation -EPR



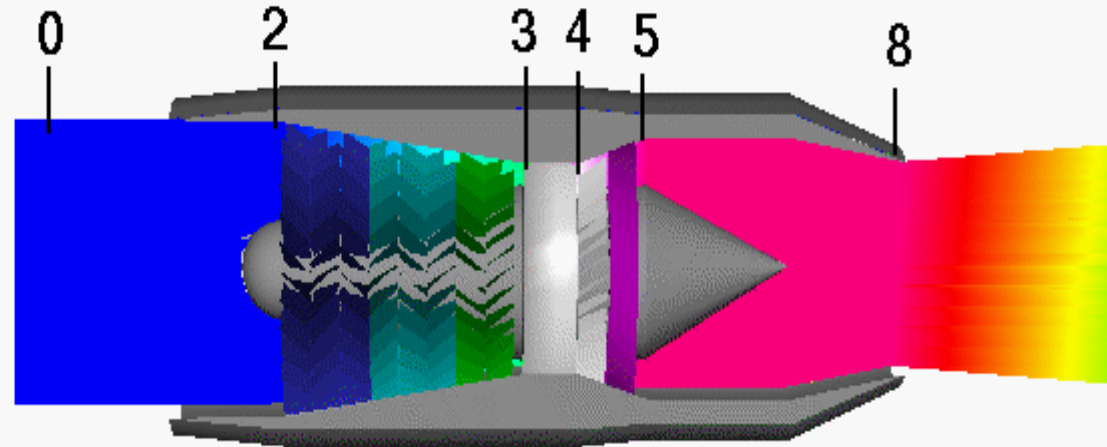
Engine Pressure Ratio = EPR

pt = total pressure

$$EPR = \frac{pt_8}{pt_2} = \frac{pt_3}{pt_2} \frac{pt_4}{pt_3} \frac{pt_5}{pt_4} \frac{pt_8}{pt_5}$$

compressor      burner      turbine      nozzle

# Temperature Variation - ETR



Engine Temperature Ratio = ETR

Tt = total temperature

$$ETR = \frac{Tt_8}{Tt_2} = \frac{Tt_3}{Tt_2} \frac{Tt_4}{Tt_3} \frac{Tt_5}{Tt_4} \frac{Tt_8}{Tt_5}$$

compressor
burner
turbine
nozzle

## *Sistem Propulsi (Definisi)*

Propulsi dari bahasa Latin Pro → maju

Peller → menggerakkan

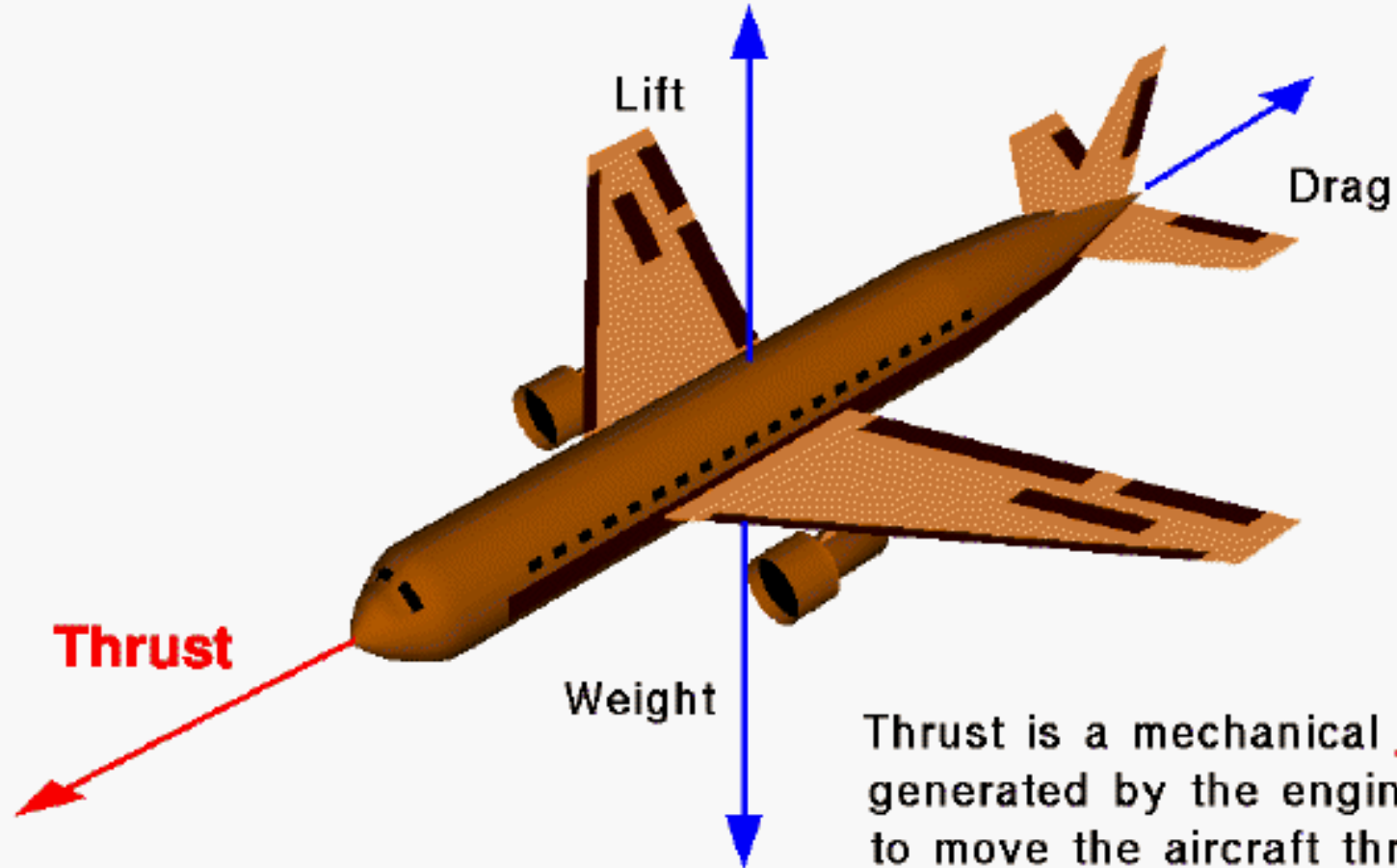
Sistem Propulsi : sistem yang menggerakkan benda ke depan, mempunyai gaya dorong atau Thrust ( Hukum III Newton: aksi-reaksi)

Saat Menjelajah: Thrust = gaya hambat

Saat Dipercepat: Thrust > Gaya hambat →

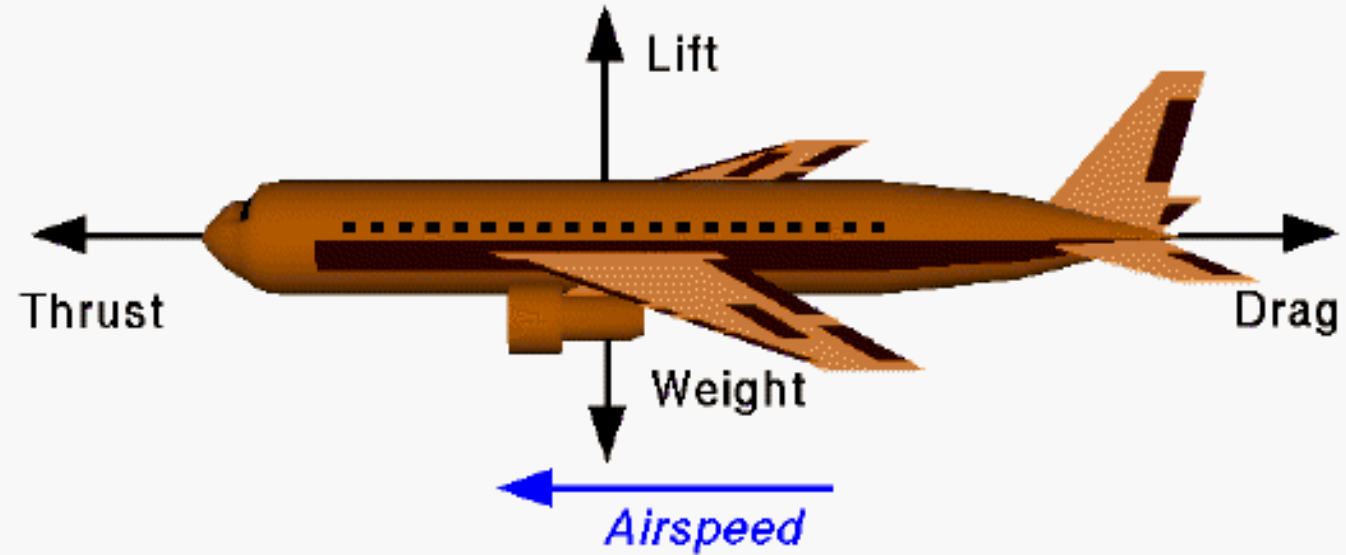
excess Thrust

# *What is Thrust ?*



Thrust is a mechanical force generated by the engines to move the aircraft through the air.

## *Cruise-Balanced Forces*

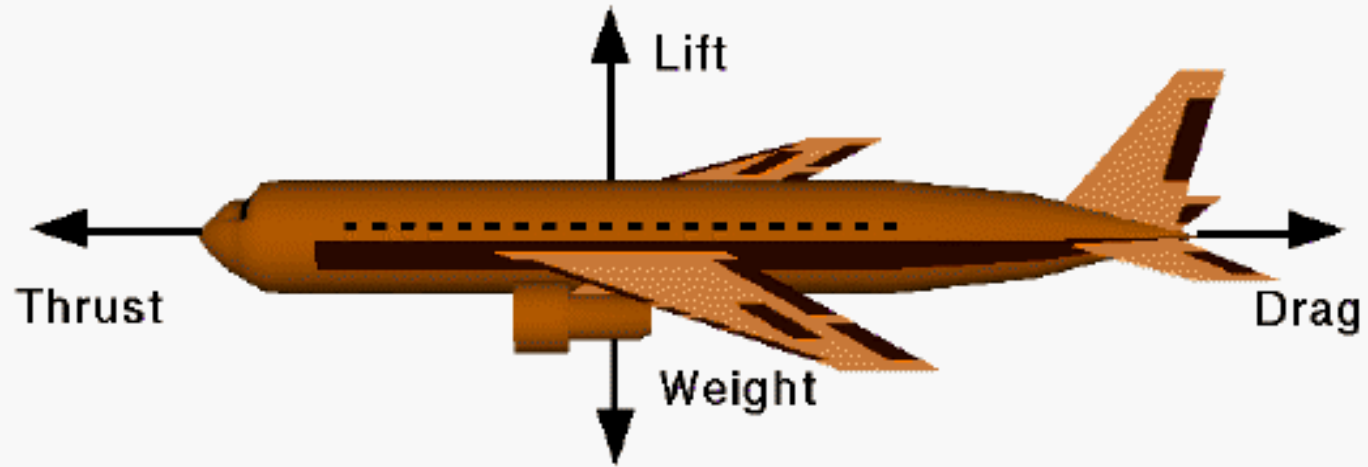


$$\text{Lift} = \text{Weight}$$

$$\text{Thrust} = \text{Drag}$$

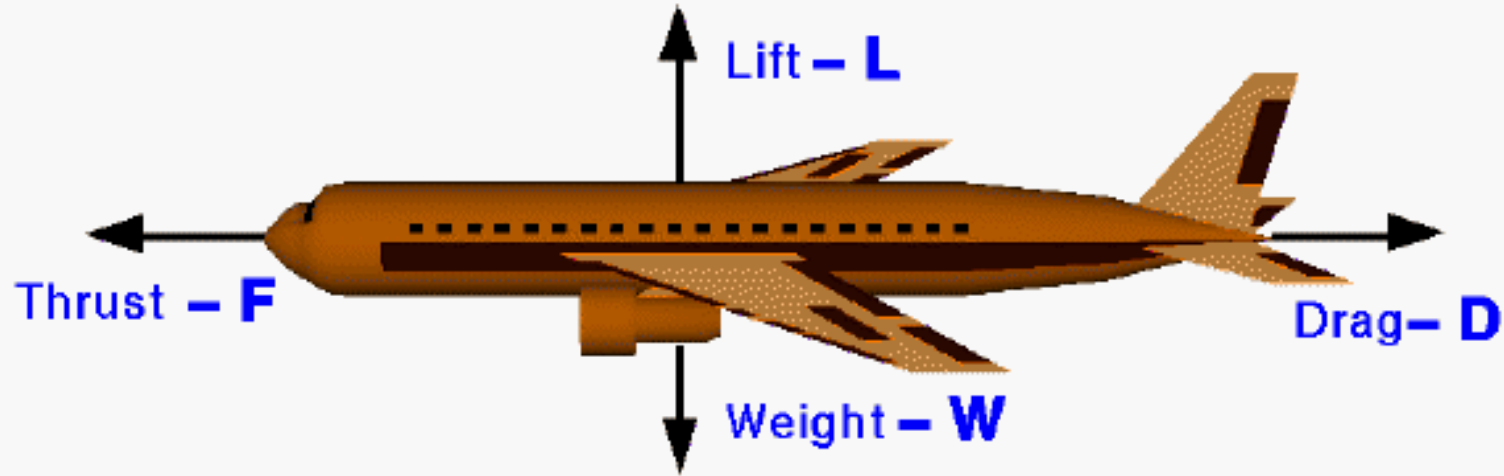
**Airplane moves in a straight line at constant airspeed.**

# *Simplified Aircraft Motion*



Flight Condition	Effect
Lift > Weight	Plane Rises
Weight > Lift	Plane Falls
Drag > Thrust	Plane Slows
Thrust > Drag	Plane Accelerates

# *Thrust Weight-Ratio*

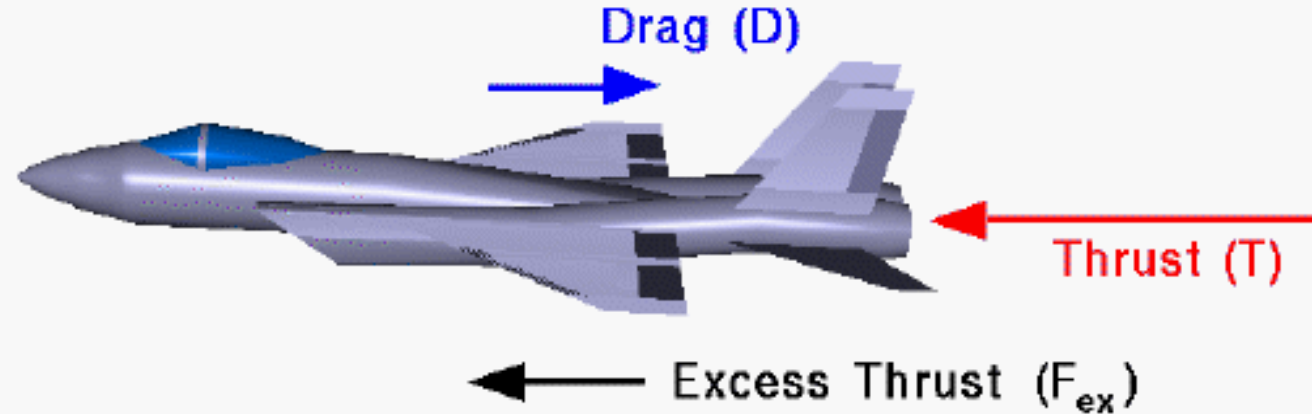


$$\frac{\mathbf{F}}{\mathbf{W}} = \frac{\text{Thrust}}{\text{Weight}} = \frac{m a}{m g} = \frac{a}{g}$$

**High F/W = High Acceleration = High Climb Rate**

**F/W > 1.0 can accelerate vertically.**

## *Excess Thrust (Thrust-Drag)*



**Excess Thrust = Thrust - Drag**

$$\mathbf{F_{ex}} = \mathbf{T} - \mathbf{D}$$

*Newton's Second Law:*  $\mathbf{F_{ex}} = \mathbf{m} \mathbf{a}$

$$\mathbf{a} = \mathbf{F_{ex}} / \mathbf{m}$$

**a** = acceleration of aircraft

**m** = mass of aircraft



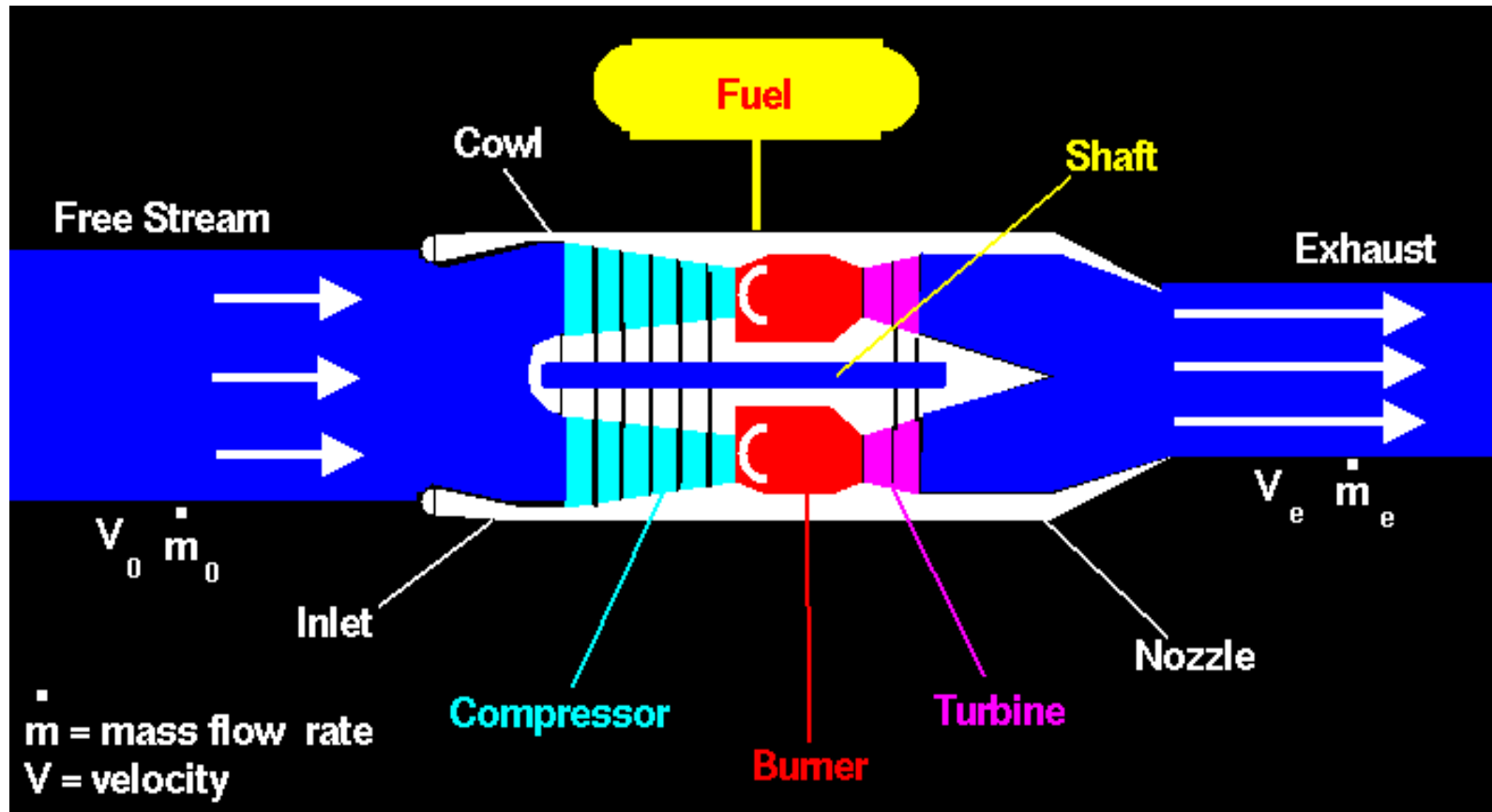
## *4 Prinsip Sistem Propulsi*

- Turbin atau Jet → turbojet, turboprop, turbofan
- Propeler → Thrust rendah, subsonic
- Ramjet → Thrust tinggi → hypersonic
- Roket → solid, cair → Thrust sangat tinggi  
→ hypersonic → ruang angkasa

Turbo jet+afterburning → excess Thrust tinggi

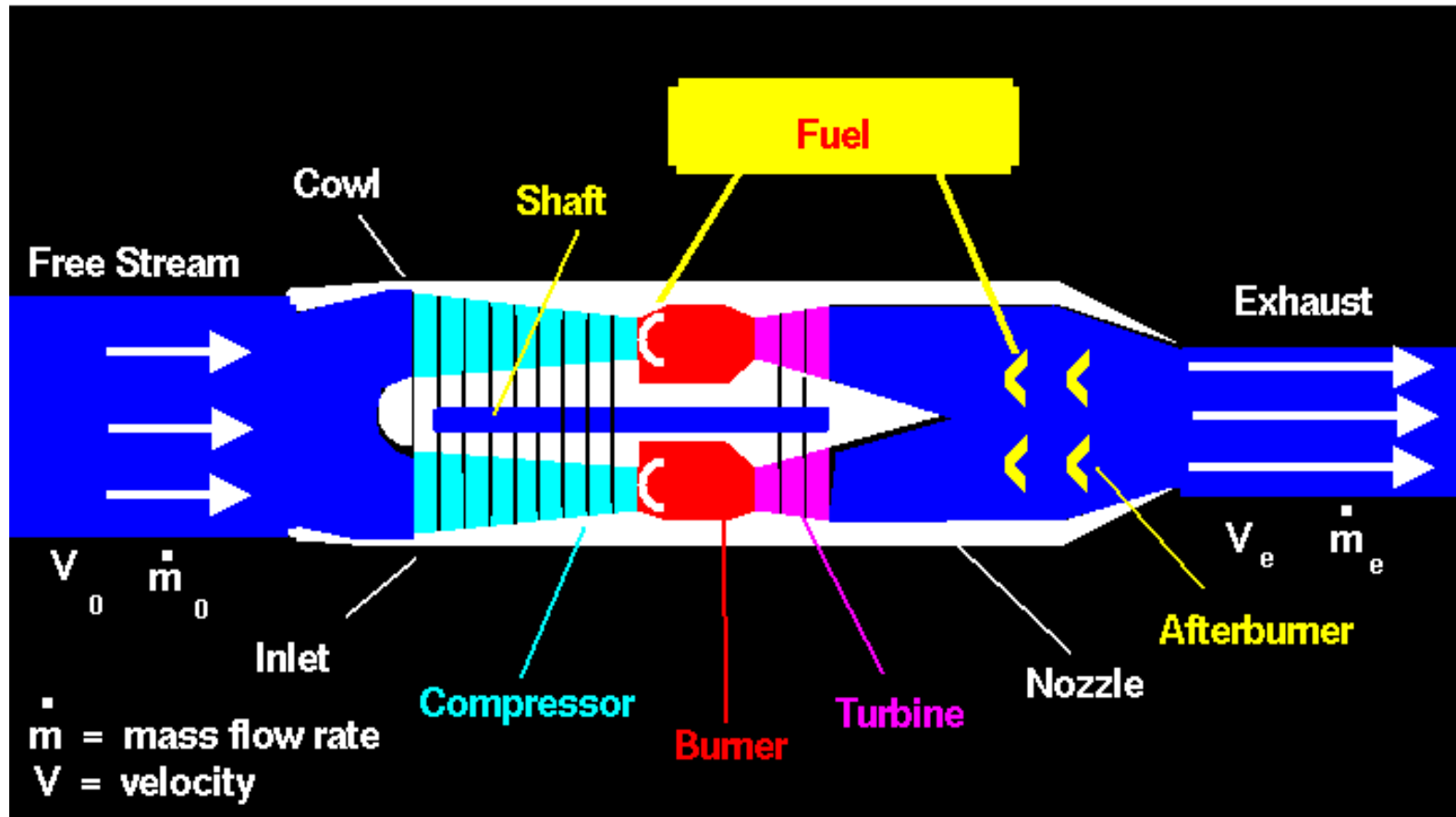
Excess Thrust tinggi untuk mengatasi drag pada kecepatan tinggi

# Turbojet Thrust



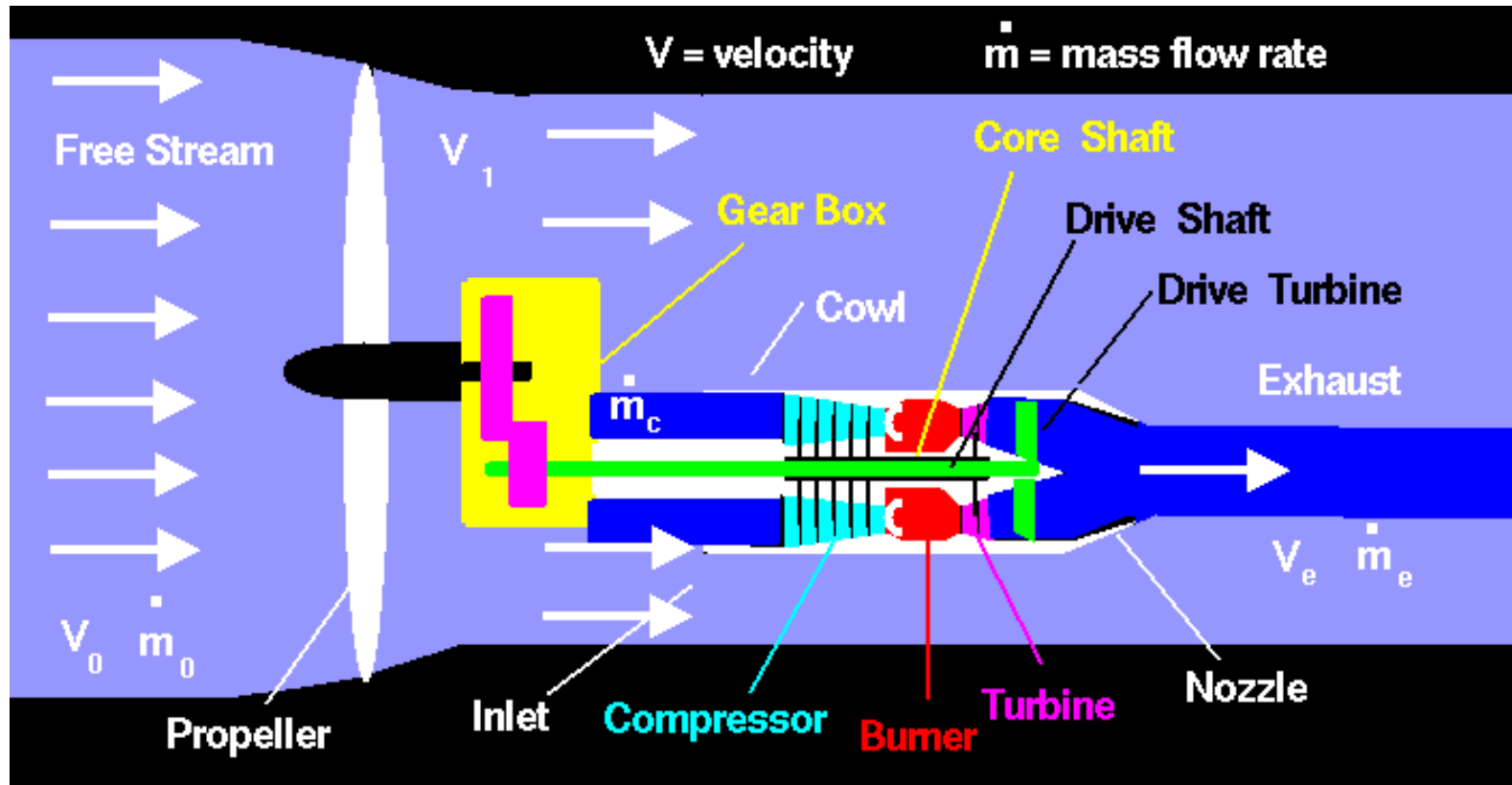
$$\text{Thrust} = F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0$$

# Afterburning Jet Thrust



$$\text{Thrust} = F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0$$

# Turboprop Thrust



Thrust = Thrust of Propeller + Thrust of Core

$$F = \dot{m}_0 V_1 - \dot{m}_0 V_0 + \dot{m}_e V_e - \dot{m}_c V_1$$

$$F = \dot{m}_0 (V_1 - V_0) + \dot{m}_e (V_e - V_1)$$

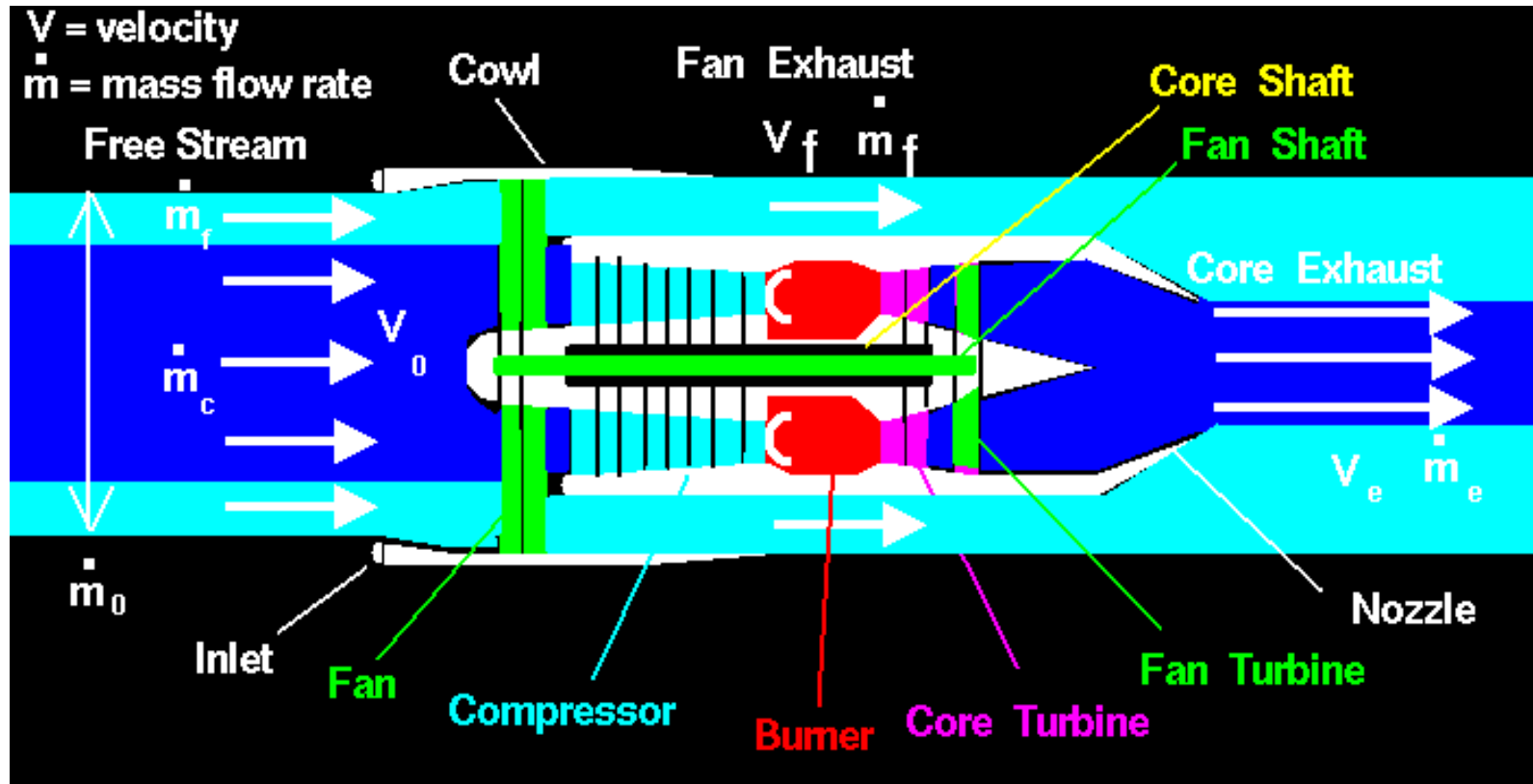
(Large)                      (Small)

Mass Flows

$$\dot{m}_0 > \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_e \sim \dot{m}_c$$

# Turbofan Thrust



**Thrust = Thrust of Fan + Thrust of Core**      **Mass flows**      **Bypass ratio = bpr**  

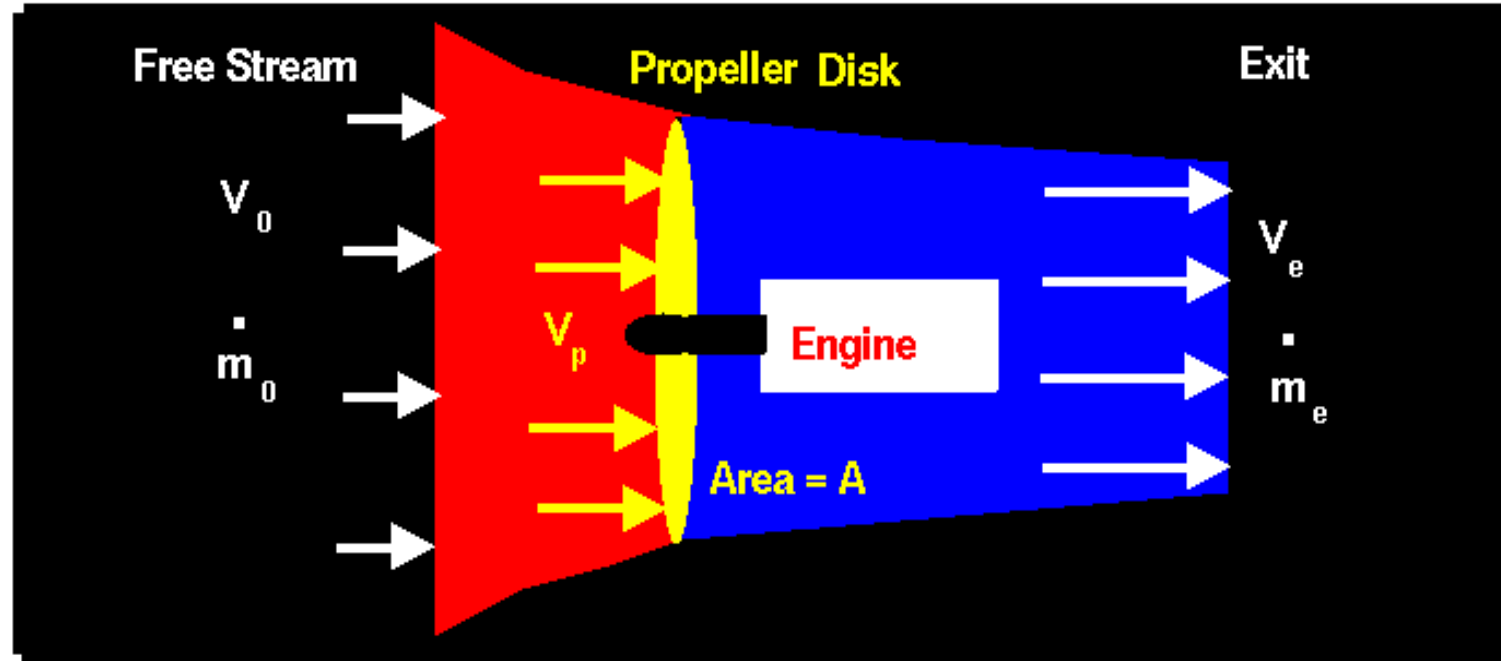
$$F = \dot{m}_f V_f - \dot{m}_f V_0 + \dot{m}_e V_e - \dot{m}_c V_0$$

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_f + \dot{m}_c$$

$$bpr = \dot{m}_f / \dot{m}_c$$

$$F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0 + bpr \dot{m}_c V_f$$

# Propeller Analysis



$r = \text{density}$

$$\text{Thrust} = F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_0 = r V_p A$$

$$F = r V_p A (V_e - V_0) = .5 r A (V_e^2 - V_0^2)$$

$$V_p = .5 (V_e + V_0)$$

# Ramjet



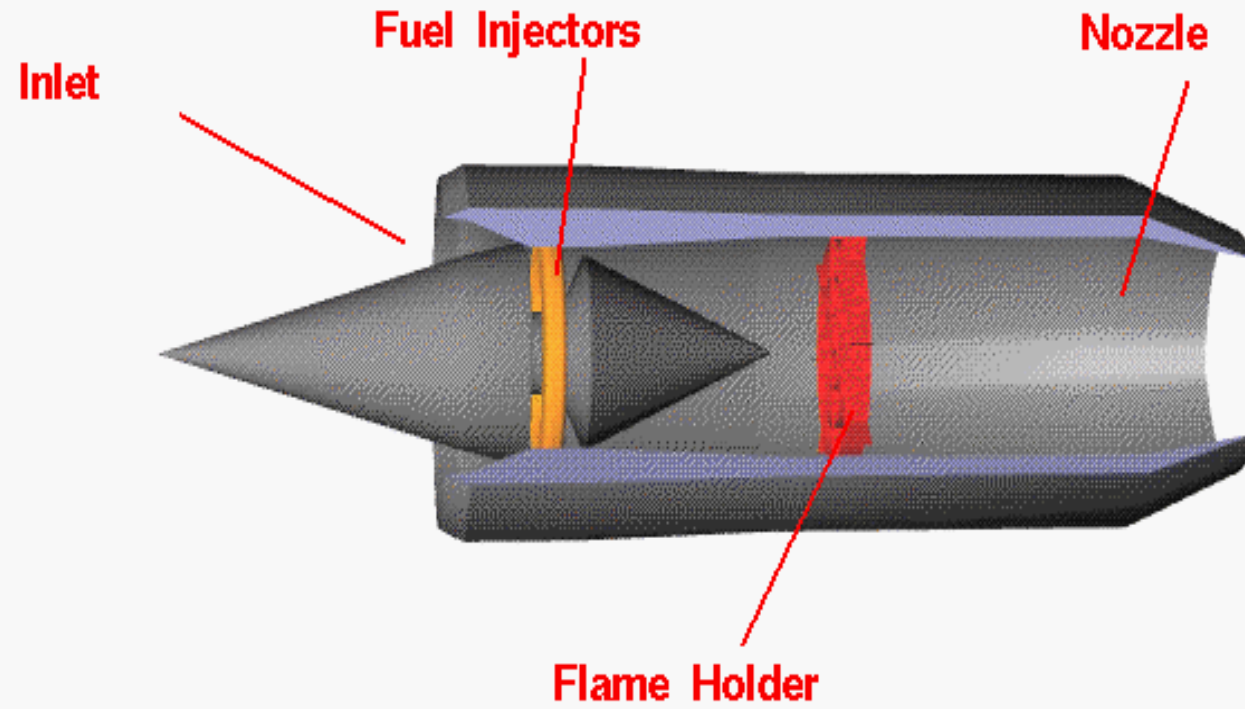
X - 15 with ramjet engine



Ramjet test

**Working fluid is the surrounding air.**

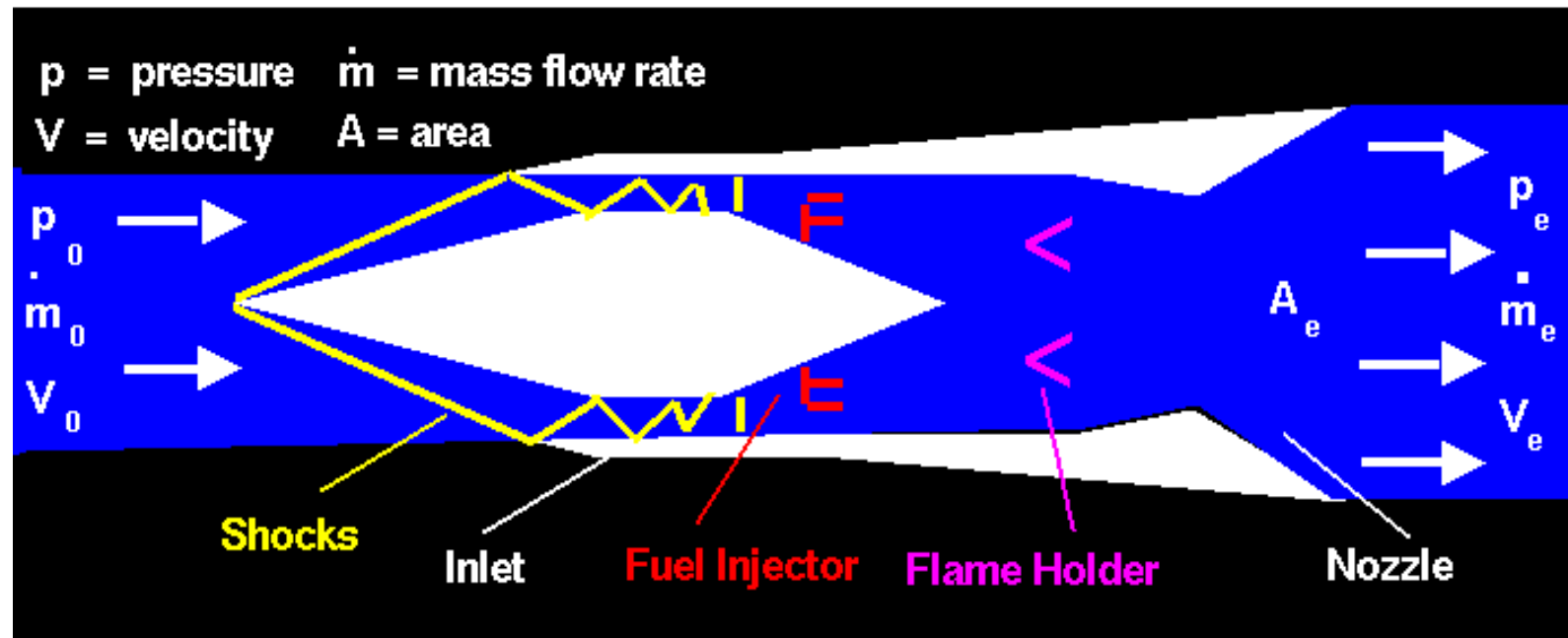
# Ramjet Parts



Simplified Computer Drawing



# Ramjet/Scramjet Thrust



$$\text{Thrust} = F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_o V_o + (p_e - p_o) A_e$$

# Rocket



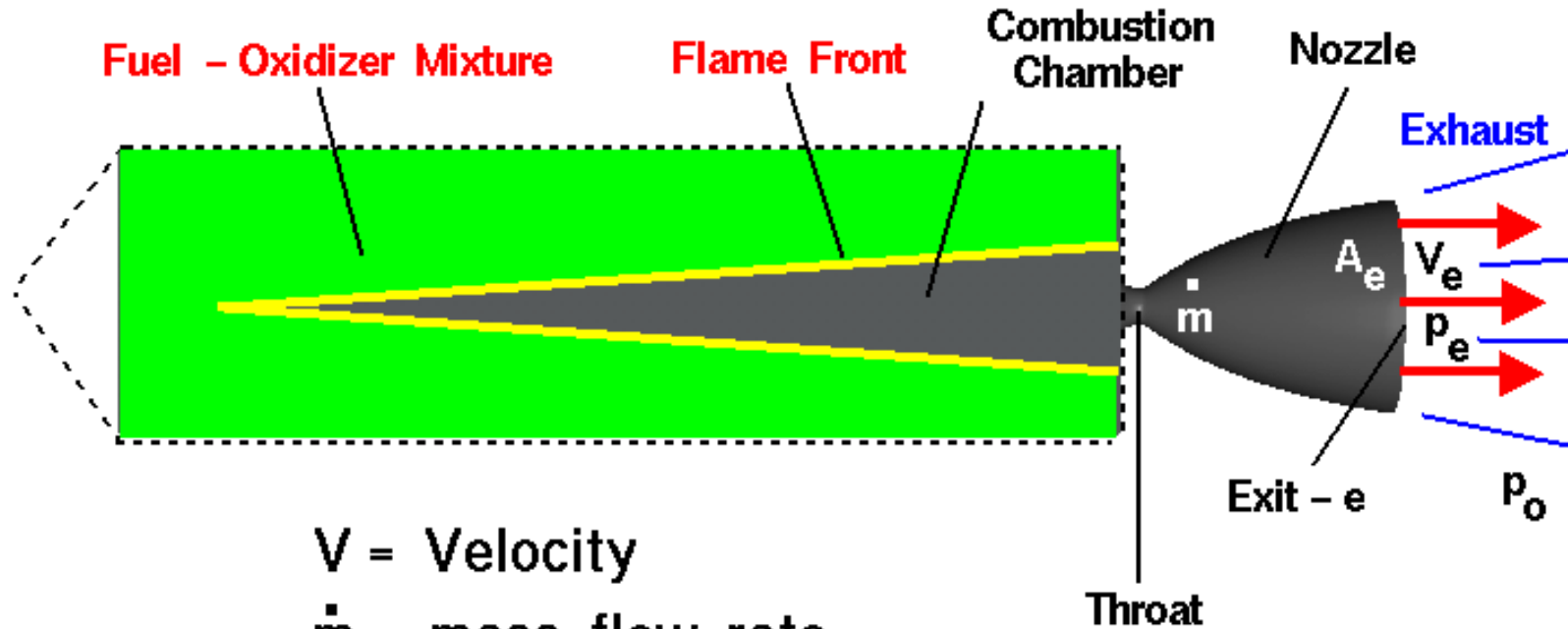
X - 15

Rocket Test



Working fluid is hot rocket exhaust.

# Solid Rocket



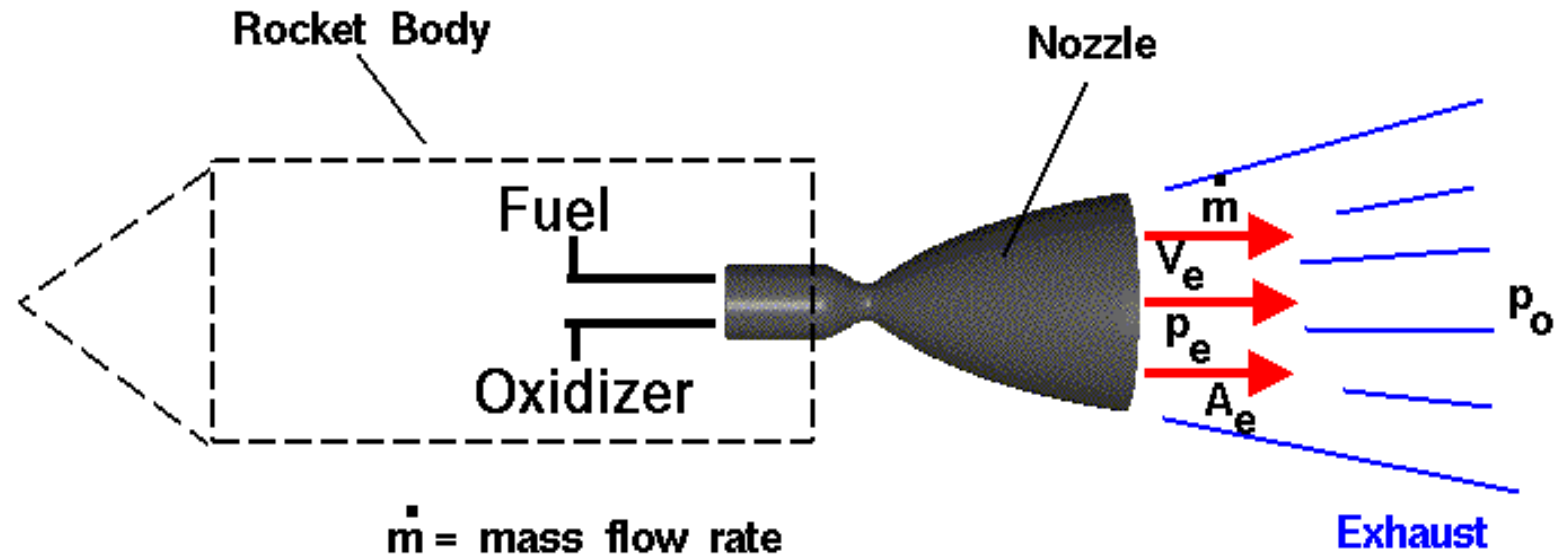
$V$  = Velocity

$\dot{m}$  = mass flow rate

$p$  = pressure

$$\text{Thrust} = F = \dot{m} V_e + (p_e - p_0) A_e$$

# Rocket Thrust



$\dot{m}$  = mass flow rate  
 $p$  = pressure  
 $V$  = Velocity  
 $A$  = Area

$$\text{Thrust} = F = \dot{m} V_e + (p_e - p_0) A_e$$