

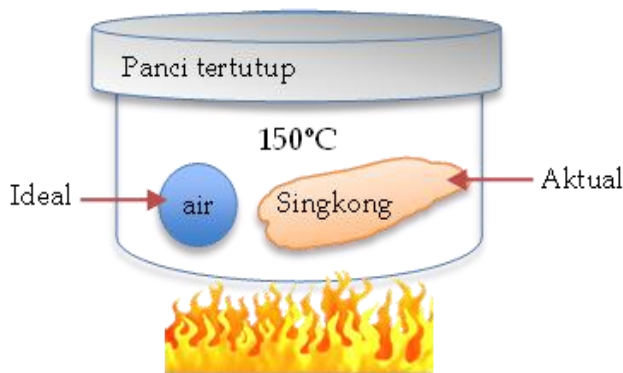
# Siklus-siklus Mesin Kalor

Tria Puspa Sari, ST., M.S.

Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur

## 9.1 Pertimbangan dasar

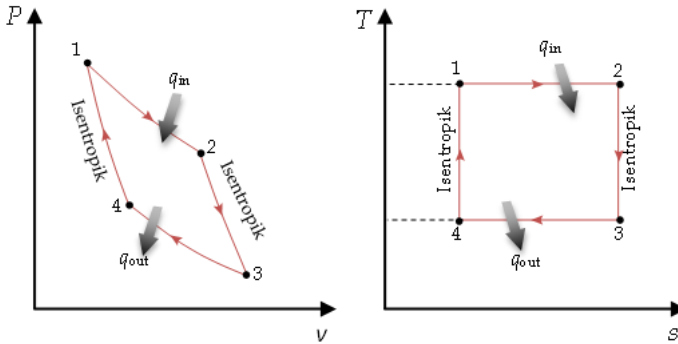
Siklus-siklus pada mesin kalor dapat dikategorikan menjadi siklus daya gas, siklus daya uap, dan siklus gabungan berdasarkan fase dari fluida kerjanya. Siklus pada mesin kalor juga dapat dikategorikan berdasarkan sirkulasi terbuka dan tertutup. Pada siklus tertutup, fluida kerja dikembalikan ke keadaan awal pada akhir siklus dan disirkulasikan kembali. Sedangkan pada siklus terbuka, fluida kerja dihentikan dan diperbarui pada akhir siklus.



**Gambar 9.1** Model Simulasi Kondisi Aktual (Singkong) Dan Ideal (Air) Yang Di Kukus Pada Suhu Tertentu

Siklus-siklus pada mesin kalor merupakan bagian dari ilmu termodinamika yang menarik untuk dipelajari. Dimana pada keadaan sebenarnya (aktual), siklus-siklus mesin kalor sangat sulit untuk dianalisa karena memiliki banyak pengaruh dari keadaan yang rumit, seperti gesekan dan waktu untuk mencapai kesetimbangan. Untuk memudahkan dalam analisis maka diperlukan kondisi ideal pada siklus tersebut, sebagai contoh model simulasi kondisi aktual dan ideal pada Gambar 9.1.

## 9.2 Siklus Carnot



**Gambar 9.2** Diagram P-V Dan T-S Siklus Carnot

Siklus Carnot terdiri dari empat proses reversibel yaitu penambahan kalor secara isothermal, ekspansi secara isentropik, pengeluaran kalor secara isothermal, dan kompresi secara isentropik seperti yang diilustrasikan oleh diagram P-v dan T-s pada Gambar 9.2. Siklus Carnot merupakan siklus yang paling efisien diantara siklus-siklus lainnya. Efisiensi termal siklus Carnot dapat dinyatakan dengan perbandingan temperatur batas bawah dan temperatur batas atas sebagai berikut:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2}$$

Efisiensi yang tinggi dari siklus Carnot ini terjadi karena perpindahan kalor secara isothermal reversibel pada waktu yang singkat. Pada kenyataan praktisnya, hal ini akan sulit dicapai karena tipikal mesin nyata membutuhkan penukar kalor yang sangat besar dan waktu yang sangat lama untuk kondisi tersebut. Sehingga secara praktik akan sangat sulit membuat mesin dengan tipikal mendekati siklus Carnot.

### 9.2 Asumsi standar udara

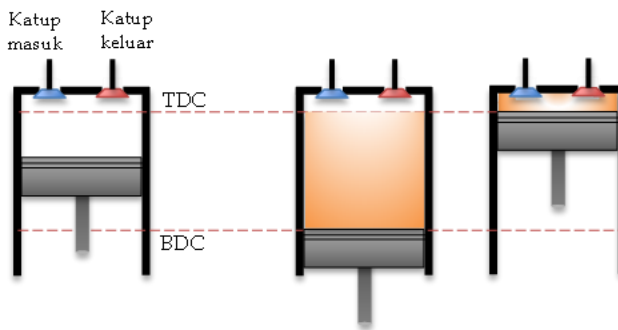
Pada siklus daya gas, fluida kerja terdapat di seluruh bagian siklus. Secara umum mesin-mesin yang beroperasi menggunakan siklus daya gas antara lain mesin bensin, mesin diesel, dan turbin gas konvensional. Siklus daya gas secara aktual memiliki perhitungan yang sangat kompleks, sehingga untuk mempermudah analisis

diperlukan asumsi dasar sebagai acuan analisa, yaitu asumsi standar udara. Berikut ini merupakan asumsi dasar untuk standar udara yang bekerja pada siklus ideal, yaitu antara lain:

*Fluida kerja adalah udara yang terus-menerus bersirkulasi dalam sistem loop tertutup dan berperilaku sebagai gas ideal,  
Proses pembakaran digantikan oleh proses penambahan kalor,  
Proses pembuangan digantikan oleh proses pembuangan kalor dimana mengembalikan fluida kerja ke keadaan semula,  
Semua proses terjadi secara internal reversible.*

### 9.3 Gerak Bolak-balik

Gerak bolak-balik ini terjadi didalam ruang pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang dilakukan oleh piston silinder di dalam ruang pembakaran tersebut. Pada Gambar 9.3 menunjukkan gerak bolak-balik dari piston silinder didalam ruang pembakaran dalam. Gerak bolak-balik piston silinder tersebut bergerak dari posisi atas atau disebut *top dead center* (TDC) ke posisi bawah atau disebut *bottom dead center* (BDC).



**Gambar 9.3** Gerak Bolak-Balik Pada Ruang Pembakaran Dalam

### 9.4 Siklus Otto dan mesin bensin ideal

Siklus Otto merupakan siklus yang bekerja pada mesin bensin ideal. Mesin ini disebut juga mesin dengan pengapian cara percikan (*spark-ignition engines*). Bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar dan diberi percikan api (*spark plug*) sehingga terjadi pembakaran di ruang bakar. Pada Gambar 9.4 menunjukkan gerakan searah dari piston silinder di dalam ruang bakar dengan 4 *stroke* (2 kali siklus mekanikal) dan 2 kali putaran dari *crankshaft*. Siklus ini

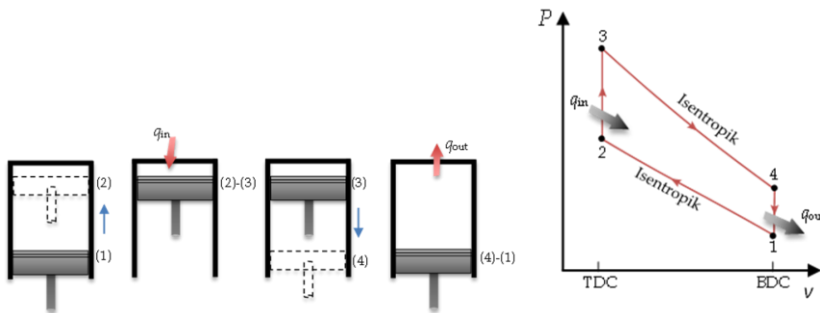
merupakan siklus Otto ideal yang terjadi pada mesin pembakaran dalam *4-stroke* (4-tak). Adapun proses yang terjadi setiap langkahnya yaitu:

Langkah (1) ke (2) adalah proses kompresi secara isentropik dengan gerakan piston silinder dari BDC ke TDC ,

Langkah (2) ke (3) terjadi penambahan kalor dengan volume konstan dan posisi piston silinder berada pada titik TDC,

Langkah (3) ke (4) merupakan proses ekspansi piston silinder ke titik BDC secara isentropik,

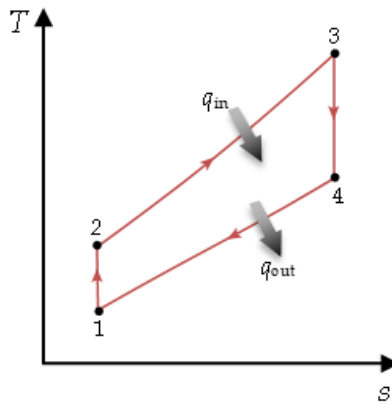
Langkah (4) ke (1) adalah proses pengeluaran kalor dengan volume konstan yang terjadi pada titik BDC,



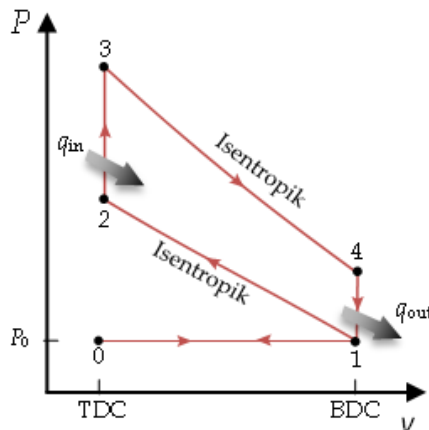
**Gambar 9.4** Siklus Otto Ideal Pada Mesin Bensin 4 Tak (*4-Stroke*) Dan Diagram  $P$ -  $V$  Siklus Otto Ideal

Pada dasarnya analisis termodinamika secara aktual pada mesin siklus *4-stroke* atau *2-stroke* memiliki kompleksitas dan kerumitan yang tinggi. Namun dengan asumsi standar udara yang disepakati sebelumnya untuk mendekati kondisi aktualnya, sehingga kita dapat menggunakan prinsip tersebut untuk mempermudah menganalisa. Prinsip tersebut disebut dengan **siklus Otto ideal**.

Diagram  $T$ - $s$  siklus Otto dideskripsikan pada Gambar 9.5, dimana volume konstan selama proses penambahan kalor pada (2) ke (3) dan pembuangan kalor pada langkah (4) ke (1). Sedangkan pada Gambar 9.6 menunjukkan siklus Otto Ideal jika menambahkan proses *intake* dan *exhaust* yaitu langkah (0) ke (1) *intake* pada tekanan konstan dan (1) ke (0) *exhaust* pada tekanan konstan.



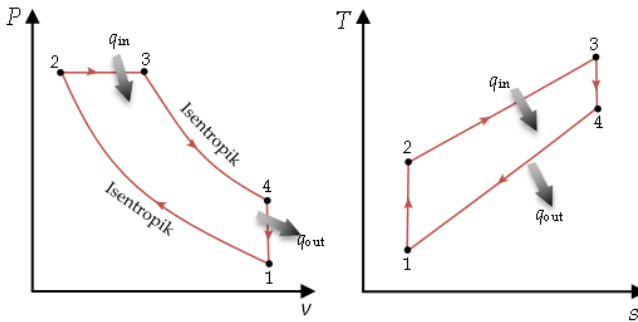
**Gambar 9.5** Diagram  $T$ - $S$  Pada Siklus Otto Ideal



**Gambar 9.6** Diagram  $P$ - $V$  Pada Siklus Otto Ideal Dengan Proses Intake Dan Exhaust

## 9.5 Siklus Diesel ideal dan motor diesel

Mesin Diesel ditemukan oleh *Rudolph Diesel* pada tahun 1890an dan disebut juga dengan mesin injeksi-kompresi (*compression-ignition engines*). Bahan bakar dan udara dicampur pada ruang bahan bakar dengan tekanan tinggi sehingga terjadi pembakaran pada ruang bakar. Pada mesin bensin, campuran udara dan bahan bakar dikompresi selama langkah kompresi, dan rasio kompresi dibatasi oleh permulaan penyalan otomatis atau ketukan mesin. Pada mesin diesel, hanya udara yang dikompresi selama langkah kompresi, menghilangkan kemungkinan penyalan otomatis.



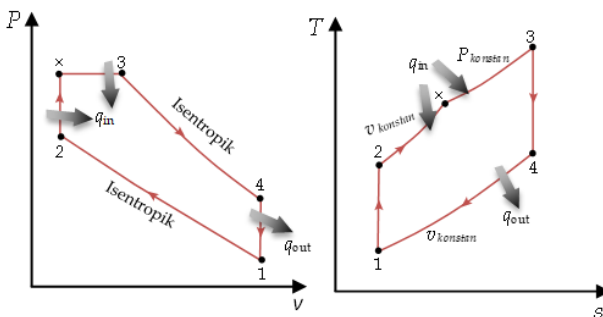
**Gambar 9.7** Diagram  $P$ - $V$  Dan  $T$ - $S$  Pada Siklus Diesel Ideal

Langkah-langkah yang terjadi selama siklus Diesel dijelaskan pada Gambar 9.7 yaitu pada Diagram  $P$ - $v$  dan  $T$ - $s$ . Adapun langkah-langkah siklus diesel ideal adalah sebagai berikut:

Langkah 1-2 adalah proses kompresi piston silinder secara isentropik, Penambahan kalor dengan tekanan konstan pada langkah 2-3, Langkah 3-4 terjadi proses ekspansi secara isentropik, Dan pembuangan kalor dengan tekanan konstan pada langkah 4-1.

## 9.6 Siklus dual

Siklus dual merupakan gabungan antara siklus otto dan siklus diesel. Pada siklus ini penambahan kalor terjadi pada dua proses yaitu penambahan kalor dengan volume konstan dan tekanan konstan. Kombinasi tersebut merupakan gambaran dari siklus *Otto* yang identik dengan volume konstan dan siklus *Diesel* dengan tekanan konstan. Siklus ini dapat digolongkan sebagai mesin modern yang memiliki kompresi injeksi dengan kecepatan tinggi.



**Gambar 9.8** Diagram  $P$ - $V$  Dan  $T$ - $S$  Pada Siklus Dual

Langkah kerja dari siklus dual dijabarkan pada Gambar 9.8, yaitu:

Langkah (1) ke (2) merupakan proses kompresi-isentropik secara adiabatik reversibel

Langkah (2) ke (x) terjadi penambahan kalor pada volume konstan

Langkah (x) ke (3) terjadi penambahan kalor pada tekanan konstan

Langkah (3) ke (4) merupakan proses ekspansi-isentropik secara adiabatik reversibel

Langkah (4) ke (1) terjadi pembuangan kalor dengan volume konstan

### 9.7 Siklus Stirling dan Ericsson

Selain siklus-siklus yang disebutkan di atas juga terdapat siklus yang melibatkan proses penambahan dan pembuangan kalor secara isothermal, kedua siklus itu disebut siklus *Stirling* dan *Ericsson*. Hal tersebut berbeda dengan prinsip kerja siklus *Carnot*, dimana dua proses isentropik digantikan dengan dua proses regenerasi volume konstan pada siklus *Stirling* dan dua proses regenerasi tekanan konstan pada siklus *Ericsson*. Proses regenerasi merupakan proses yang mentransfer panas ke perangkat penyimpanan energi termal (regenerator) selama satu bagian siklus dan ditransfer kembali ke fluida kerja pada bagian siklus lainnya.

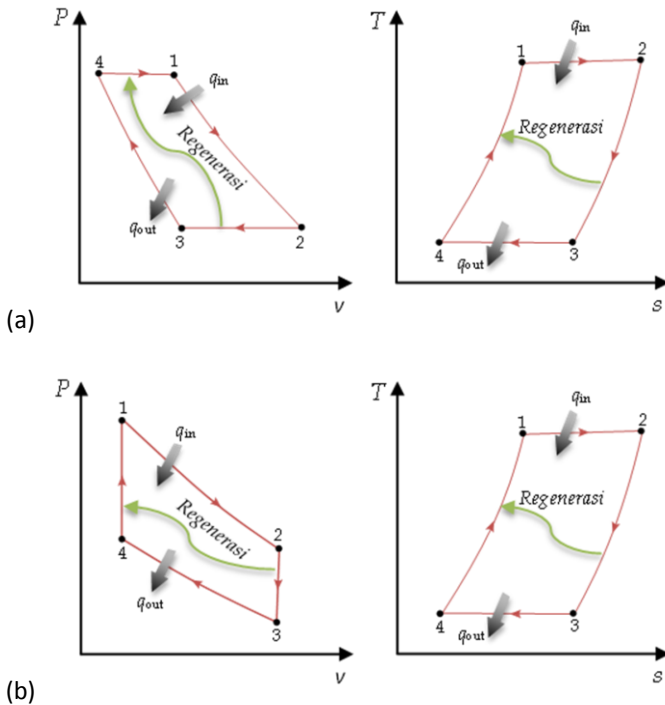
Adapun langkah kerja siklus *Stirling* terdiri dari pada Gambar 9.9(a):

Langkah 1-2 terjadi proses ekspansi pada temperatur konstan dan terdapat penambahan kalor dari sumber eksternal,

Langkah 2-3 terjadi transfer kalor internal dari kerja fluida ke generator pada volume konstan (proses regenerasi)

Langkah 3-4 terjadi proses kompresi pada temperatur konstan dan pembuangan kalor ke sistem eksternal.

Langkah 4-1 merupakan proses regenerasi pada volume konstan sehingga terjadi transfer kalor internal dari regenerator kembali ke fluida kerjanya.



**Gambar 9.9** Diagram  $P$ - $V$  Dan  $T$ - $S$  Pada Siklus (A) Stirling Dan (B) Ericsson

Sedangkan langkah-langkah kerja siklus *Ericsson* pada Gambar 9.9 (b), yaitu:

Langkah 1-2 terjadi proses ekspansi pada temperatur konstan dan terdapat penambahan kalor dari sumber eksternal,

Langkah 2-3 terjadi transfer kalor internal dari kerja fluida ke generator pada tekanan konstan (proses regenerasi)

Langkah 3-4 terjadi proses kompresi pada temperatur konstan dan pembuangan kalor ke sistem eksternal.

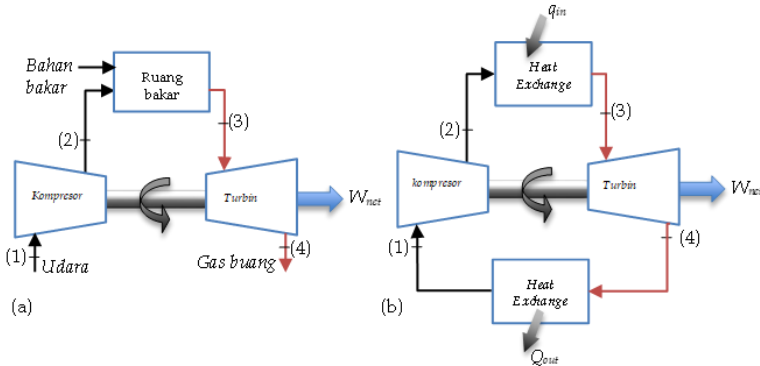
Langkah 4-1 merupakan proses regenerasi pada tekanan konstan sehingga terjadi transfer kalor internal dari regenerator kembali ke fluida kerjanya.

## 9.8 Siklus Brayton ideal

Siklus *Brayton* merupakan siklus yang bekerja pada turbin gas dan proses kompresi-ekspansi hanya terjadi pada bagian mesin yang



berotasi. Berbeda dengan siklus-siklus sebelumnya yang hanya bekerja pada sistem tertutup, siklus *Brayton* dapat bekerja pada sistem terbuka dan sistem tertutup.



**Gambar 9.10** Skema Turbin Gas (A) Sistem Terbuka Dan (B) Sistem Tertutup

Gambar 9.10a menunjukkan turbin gas yang beroperasi pada sistem tertutup, udara segar disekitar ditarik ke masuk kompresor, di mana temperatur dan tekanannya dinaikkan. Bahan bakar dan udara dari kompresor yang bertekanan tinggi kemudian masuk ke dalam ruang bakar dan terjadi proses pembakaran pada tekanan konstan. Gas keluar dari ruang bakar memiliki temperatur tinggi kemudian masuk ke turbin dan terjadi proses ekspansi menuju tekanan atmosfer. Disamping itu juga menghasilkan menghasilkan energi ( $W_{net}$ ). Proses akhir merupakan proses pembuangan gas dari turbin (gas buang), hasil gas buang tersebut tidak disirkulasi ulang.

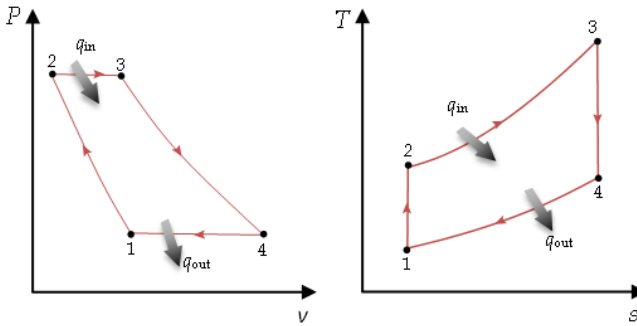
Siklus tertutup pada Turbin gas sama dengan siklus-siklus mesin kalor lainnya namun pada proses pembakaran terjadi pada tekanan konstan, yaitu :

Langkah 1-2 merupakan proses kompresi secara isentropik dikompresor,

Langkah 2-3 terjadi penambahan kalor dengan tekanan konstan di dalam,

Langkah 3-4 merupakan proses ekspansi secara isentropik di turbin,

Langkah 4-1 terjadi pembuangan kalordengan tekanan konstan,



**Gambar 9.11** Diagram  $P$ - $V$  Dan  $T$ - $S$  Pada Siklus  $Brayton$  Ideal

Langkah-langkah diatas dapat dilihat dengan diagram  $P$ - $v$  dan  $T$ - $s$  pada Gambar 9.11. Tentunya siklus yang terjadi di Turbin gas ini diasumsikan sesuai dengan standar udara dan terjadi pada aliran tunak (*steady flow*). Dimana energi kinetik dan potensial diabaikan selama proses, sehingga kesetimbangan energi pada proses aliran tunak ini dapat dijabarkan sebagai berikut (Cengel, 2019):

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{keluar} - h_{masuk}$$

kemudian berdasarkan kesetimbangan energi diatas kita dapat mengetahui perpindahan panasnya (Cengel, 2019), yaitu:

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

Sehingga nilai efisiensi termal dari siklus  $Brayton$  ideal merupakan perbandingan antara energi yang dihasilkan dan energi yang dibutuhkan, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta_{Brayton} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

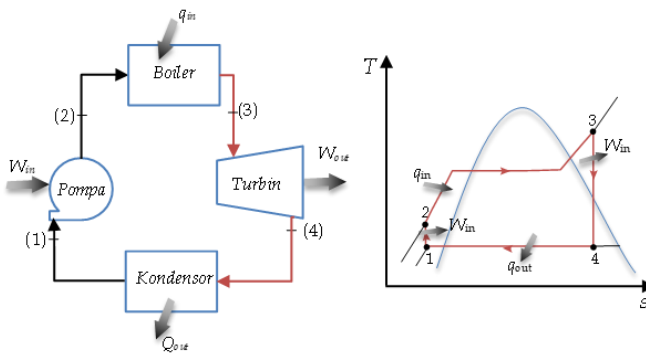
## 9.9 Siklus daya uap

Pada siklus daya uap, fluida kerja yang bekerja selama proses merupakan uap (*steam*). Pada umumnya siklus ini diterapkan pada pembangkit listrik tenaga uap. Berbeda dengan siklus daya gas yang menggunakan siklus *carnot* sebagai dasar analisisnya. Pada siklus daya uap tidak menggunakan siklus *carnot* melainkan siklus *Rankine*, dimana siklus ini memiliki empat proses siklus secara reversibel internal. Proses-proses tersebut antara lain: penambahan kalor pada

tekanan konstan di boiler, ekspansi secara isentropik di turbin, pembuangan kalor pada tekanan konstan di kondensor, dan kompresi secara isentropik di pompa. Pada siklus *Rankine*, efisiensi termal dapat ditingkatkan dengan menaikkan temperatur rata-rata ketika panas ditransfer ke fluida kerjanya dan atau jika temperatur rata-rata diturunkan ketika proses pembuangan kalor ke media pendingin.

Siklus *Rankine* ideal dijelaskan dengan skema dan diagram *T-s* pada Gambar 9.12, dimana siklus tersebut diterapkan pada pembangkit listrik tenaga uap. Adapun langkah-langkah siklus *Rankine* ideal adalah sebagai berikut:

- Langkah 1-2 merupakan kompresi isentropik yang terjadi pada pompa
- Langkah 2-3 terjadi penambahan kalor di boiler dengan tekanan konstan
- Langkah 3-4 adalah proses ekspansi secara isentropik di dalam turbin
- Langkah 4-1 terjadi pembuangan kalor di kondensor dengan tekanan konstan



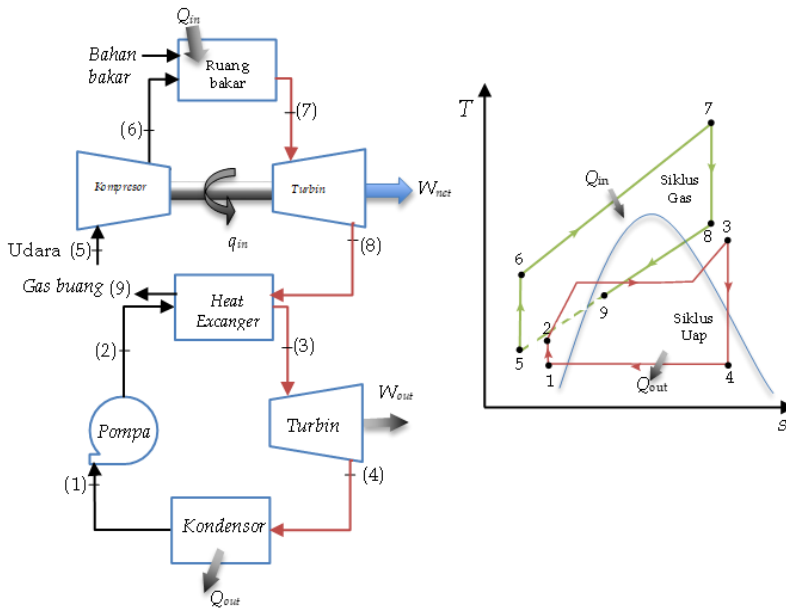
**Gambar 9.12** Siklus *Rankine* Ideal Dan Diagram *T-S*

Temperatur Rata-Rata Selama Pembuangan Kalor Dapat Diturunkan Dengan Cara Menurunkan Tekanan Keluar Pada Turbin. Dengan Begitu, Sebagian Besar Tekanan Kondensor Pada Pembangkit Tenaga Uap Tersebut Bernilai Jauh Dibawah Tekanan Atmosfer. Sedangkan, Kita Dapat Meningkatkan Temperatur Rata-Rata Selama Penambahan Kalor Dengan Cara Menaikkan Tekanan Pada Boiler Atau Dengan Cara Memanaskan Fluida Kerja Ke Suhu

Tinggi. Namun, Hal Demikian Ada Batas Tingkat Pemanasan Yang Berlebih, Karena Temperatur Fluida Memiliki Nilai Aman Sesuai Dengan Sifat Metalurginya.

### 9.10 Siklus gabungan tenaga gas dan uap

Untuk meningkatkan efisiensi yang lebih tinggi maka disusunlah sebuah mesin yang bekerja dengan dua siklus yaitu gabungan antara siklus *Brayton* dan *Rankine*. Siklus gabungan gas dan uap dapat dilihat pada Gambar 9.12, dimana gabungan dari sistem tertutup siklus uap dengan siklus terbuka siklus gas. Energi yang berupa panas dari turbin ditransferkan ke *heat exchanger* (boiler) dan kemudian menjadi gas buang.



**Gambar 9.12** Siklus Gabungan Dan Diagram  $T-S$

Siklus gabungan ini dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi termal pada pembangkit listrik. Karena gas buang turbin yang memiliki temperatur tinggi tidak langsung terbuang dengan begitu saja, namun dimanfaatkan sebagai fluida kerja untuk boiler. Siklus gabungan ini menggabungkan kinerja dari siklus turbin gas yang beroperasi pada rata-rata temperatur tinggi dan siklus turbin uap pada rata-rata temperatur rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Branchini, L. (2015). *Waste-to-Energy Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants*. New York: Springer.
- Çengel, Yunus A., et.al. (2019). *Thermodynamics: an engineering approach*, Ninth edition. New York: McGraw-Hill Education.
- Gülen, S.C. (2019). *Gas Turbine Combined Cycle Power Plants*. Boca Raton: CRC Press.
- Invernizzi, C.M. (2013). *Closed Power Cycles: Thermodynamic Fundamentals and Applications*. (Lecture Notes in Energy 11). Springer-Verlag, London.
- Moran, M.J. & Shapiro, H.N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* 5th edition. Danvers: John sWiley & Sons.
- Munson B. R., et.al. (2002). *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. New York: CUP.
- Silhavy, M. (2002). *The mechanics and thermodynamics of continuous media*. New York: Springer.
- Stowe, K. (2007). *An Introduction to Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.



### *Tentang Penulis*

---

**Tria Puspa Sari, S.T., M.S.**

**email :** [tria.puspa.tm@upnjatim.ac.id](mailto:tria.puspa.tm@upnjatim.ac.id)

Penulis lahir di Kabupaten Gresik, tanggal 11 Maret 1994. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Mesin di Universitas Brawijaya Malang dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Mesin di National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. Saat ini penulis aktif menulis dan meneliti di bidang konsentrasi konversi energi, terutama bidang energi alternatif dan terbarukan.