

Τεχνική Θερμοδυναμική

Θερμοδυναμικοί κύκλοι παραγωγής ισχύος

Αλέξανδρος Δ. Γκότσης

Πολυτεχνείο Κρήτης

γραφείο: 141B83, κτήριο Γενικού

τηλ. 7259· email: gotsis@science.tuc.gr

: agotsis58@gmail.com

24 Μαΐου, 2022

Κύκλοι παραγωγής ισχύος

- **Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα:**

- ☐ Carnot
- ☐ Otto
- ☐ Diesel
- ☐ Stirling
- ☐ Ericsson
- ☐ Brayton

Κύκλοι παραγωγής ισχύος

- **Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα:**

- ☐ Carnot
- ☐ Otto
- ☐ Diesel
- ☐ Stirling
- ☐ Ericsson
- ☐ Brayton

- **Κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό:**

- ☐ Rankine
- ☐ συμπαραγωγής

Ψυκτικοί κύκλοι

- Παραγωγής ψύξης

Θερμοδυναμικοί κύκλοι

- ☐ Κλειστοί θερμοδυναμικοί κύκλοι

Το ρευστό λειτουργίας επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση

- ☐ Ανοικτοί θερμοδυναμικοί κύκλοι

Το ρευστό λειτουργίας ανανεώνεται στο τέλος του κύκλου

Θερμοδυναμικοί κύκλοι

- ☐ Κλειστοί θερμοδυναμικοί κύκλοι

Το ρευστό λειτουργίας επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση

- ☐ Ανοικτοί θερμοδυναμικοί κύκλοι

Το ρευστό λειτουργίας ανανεώνεται στο τέλος του κύκλου

- **Θερμικές μηχανές**

- ☐ Μηχανές εσωτερικής καύσης

- ☐ Μηχανές εξωτερικής καύσης

Ανάλυση κύκλων παραγωγής ισχύος

- Πραγματικός κύκλος
- Ιδανικός κύκλος
- Κύκλος Carnot
- Μη αντιστρεπτές
- Εσωτερικά αντιστρεπτές
- Πλήρως αντιστρεπτές

Θερμική απόδοση

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} = \frac{w_{net,out}}{q_{in}}$$

Βασικές παραδοχές

- Δεν υπάρχουν τριβές

Βασικές παραδοχές

- Δεν υπάρχουν τριβές
- Σχεδόν εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες εκτόνωσης / συμπίεσης

Βασικές παραδοχές

- Δεν υπάρχουν τριβές
- Σχεδόν εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες εκτόνωσης / συμπίεσης
- Αμελητέες απώλειες θερμότητας στις σωληνώσεις

Βασικές παραδοχές

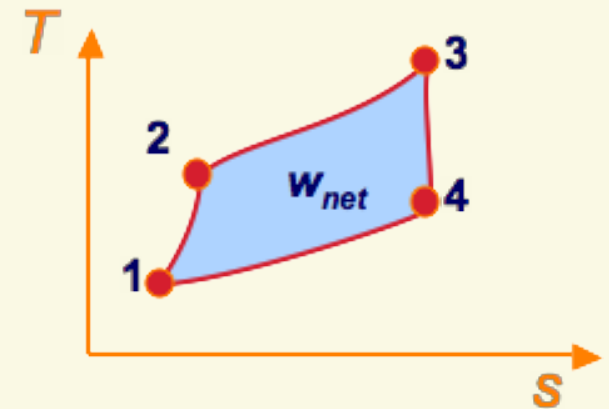
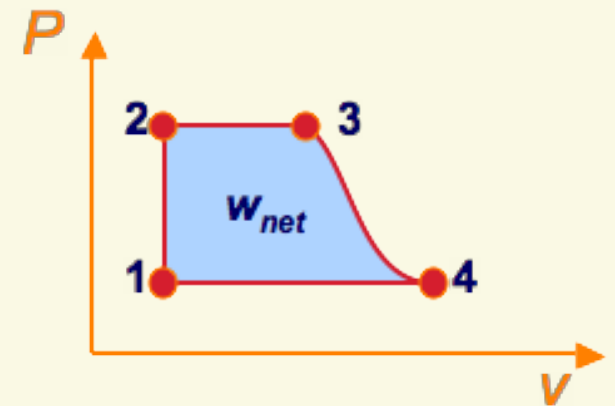
- Δεν υπάρχουν τριβές
- Σχεδόν εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες εκτόνωσης / συμπίεσης
- Αμελητέες απώλειες θερμότητας στις σωληνώσεις
- Αμελητέα μεταβολή κινητικής ενέργειας

Βασικές παραδοχές

- Δεν υπάρχουν τριβές
- Σχεδόν εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες εκτόνωσης / συμπίεσης
- Αμελητέες απώλειες θερμότητας στις σωληνώσεις
- Αμελητέα μεταβολή κινητικής ενέργειας
- Αμελητέα μεταβολή δυναμικής ενέργειας

Διαγράμματα

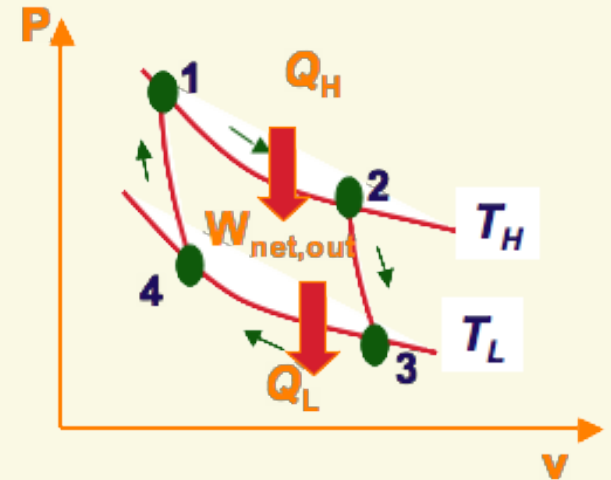
- Διάγραμμα P-v
- Διάγραμμα T-s



Παράδειγμα: Ο κύκλος Carnot

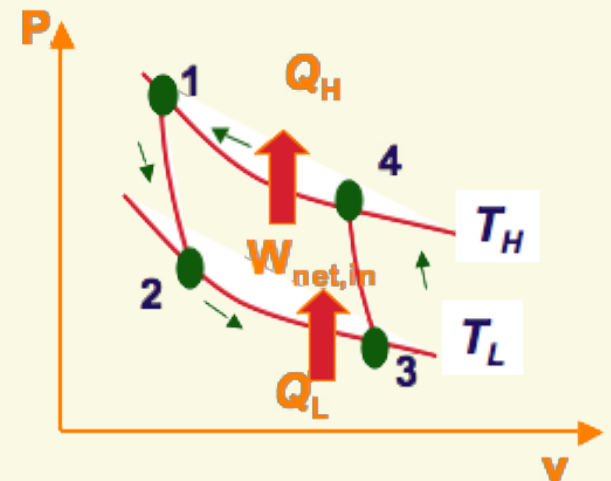
— Θερμικός κύκλος Carnot

- 1-2: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T_H)
- 2-3: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση ($T_H \rightarrow T_L$)
- 3-4: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_L)
- 4-1: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση ($T_L \rightarrow T_H$)

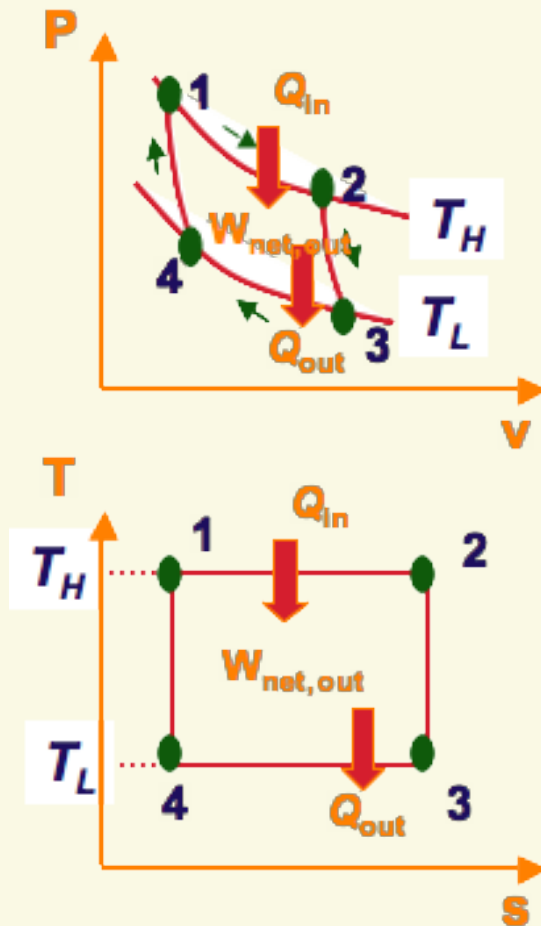


— Ψυκτικός κύκλος Carnot

- 1-2: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση ($T_H \rightarrow T_L$)
- 2-3: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T_L)
- 3-4: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση ($T_L \rightarrow T_H$)
- 4-1: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_H)



Η απόδοση του κύκλου Carnot και κάθε αντιστρεπτού κύκλου



$$\eta_{Carnot} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Η θερμική απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία γίνεται η προσθήκη της θερμότητας στο σύστημα ή με τη μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται η απόρριψη της θερμότητας από το σύστημα

Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα

Μηχανές εσωτερικής καύσης

- Otto
- Diesel

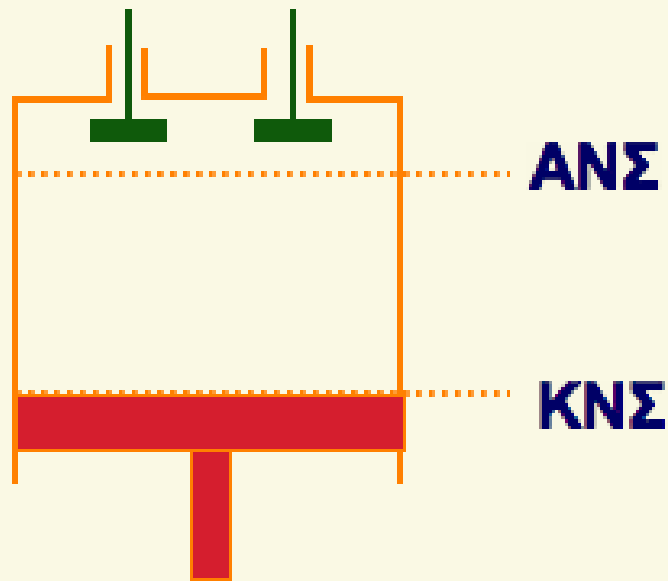
Αέρας + καύσιμο → Προϊόντα καύσης



Παραδοχές πρότυπου αέρα (κύκλος πρότυπου αέρα)

- Ρευστό λειτουργίας = αέρας (ιδανικό αέριο)
- Οι διεργασίες του κύκλου είναι εσωτερικά αντιστρεπτές
- Η διεργασία καύσης αντικαθίσταται από εισαγωγή θερμότητας
- Η διεργασία εξαγωγής ρευστού αντικαθίσταται από απόρριψη θερμότητας
- Ειδικές θερμότητες αέρα σταθερές ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

Μηχανές εσωτερική καύσης - Παλινδρομικές



- Άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ, TDC)
- Κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ, BDC)
- Νεκρός όγκος
- Όγκος εμβολισμού
- Λόγος συμπίεσης, $r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$
- Μέση αποτελεσματική πίεση,

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{BDC} - V_{TDC}}$$

Μηχανές εσωτερικής καύσης

- **Μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα : (SI) Otto**

Το μίγμα αέρα καυσίμου συμπιέζεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει με τη βοήθεια σπινθήρα (βενζινοκινητήρας)

Μηχανές εσωτερικής καύσης

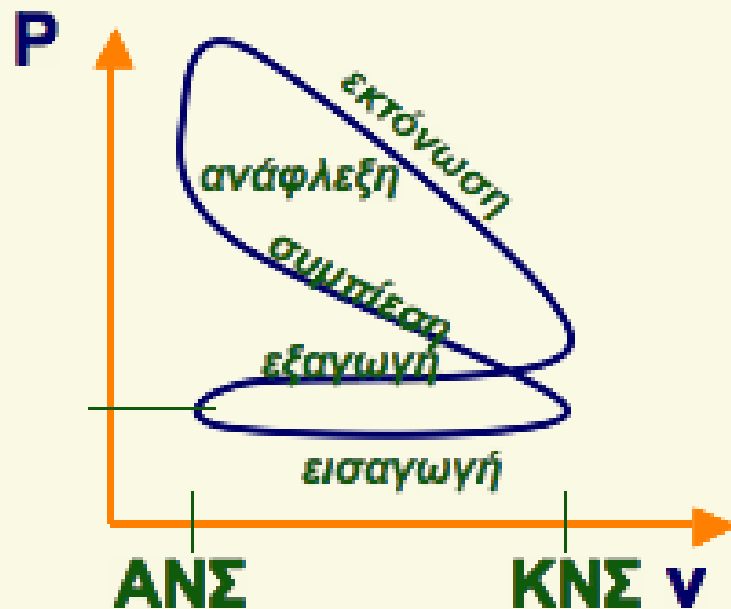
- **Μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα : (SI) Otto**

Το μίγμα αέρα καυσίμου συμπιέζεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει με τη βοήθεια σπινθήρα (βενζινοκινητήρες)

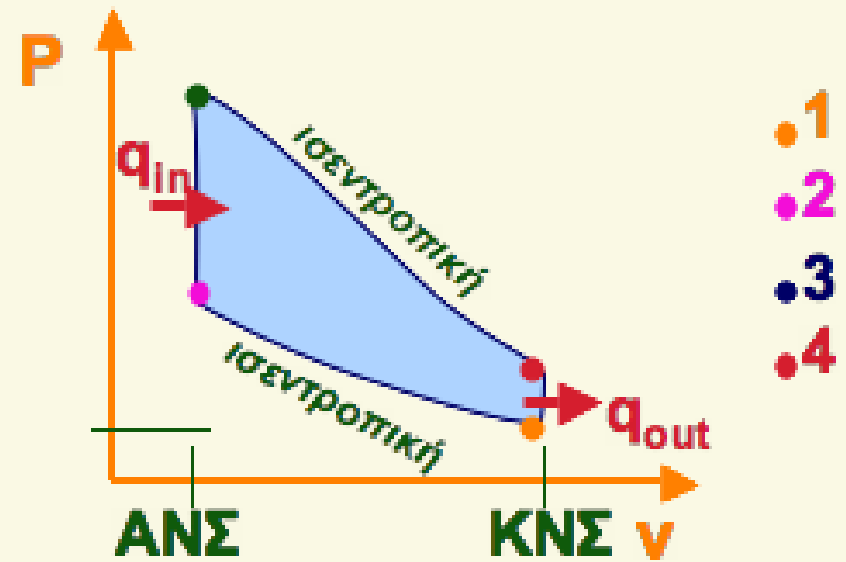
- **Μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση: (CI) Diesel**

Το μίγμα αέρα καυσίμου συμπιέζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει καθώς το καύσιμο ψεκάζεται μέσα σε θερμό αέρα (πετρελαιοκινητήρες)

Κύκλος του Otto (μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα)

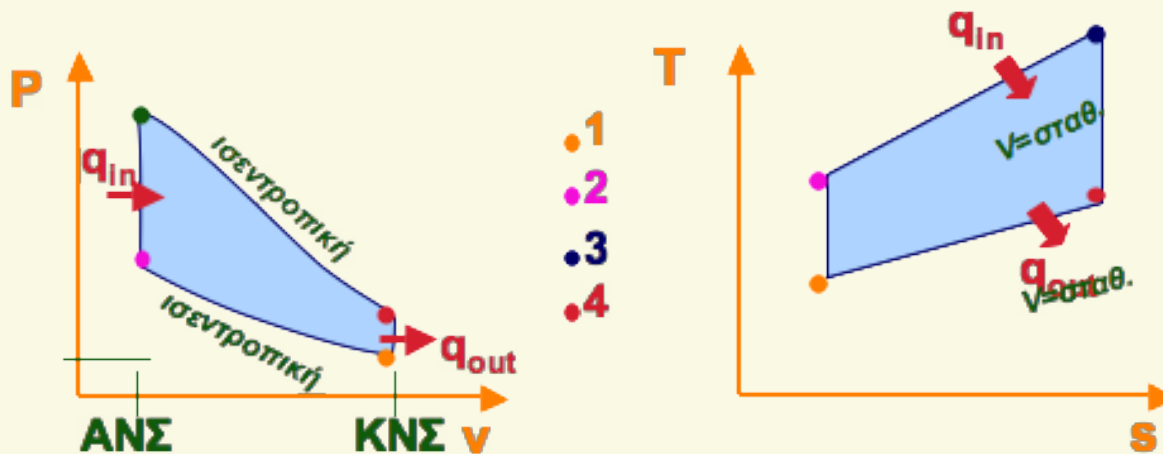


Πραγματικός κύκλος



Ιδανικός κύκλος

Ιδανικός κύκλος Otto



- 1 → 2 : ισεντροπική συμπίεση
- 2 → 3 : ισόχωρη θέρμανση (Q_H)
- 3 → 4 : ισεντροπική εκτόνωση
- 4 → 1 : ισόχωρη ψύξη ($-Q_L$)

$$q_{in} - q_{out} + w_{in} - w_{out} = \Delta U$$

Αν έχουμε σταθερές C_p και C_v :

$$q_{in} = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2) \quad q_{out} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th,Otto} = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

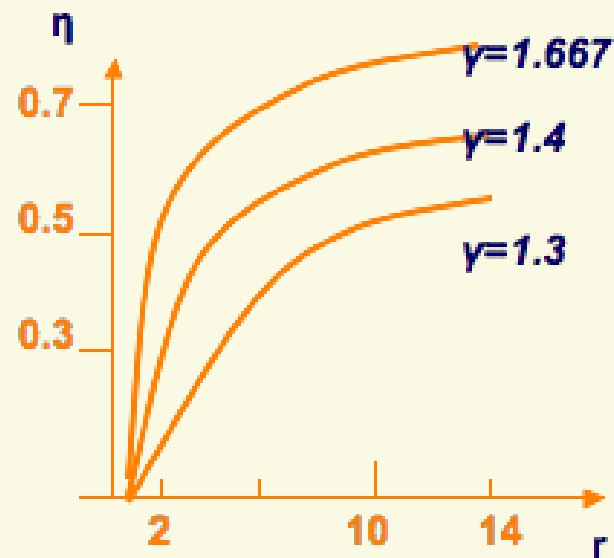
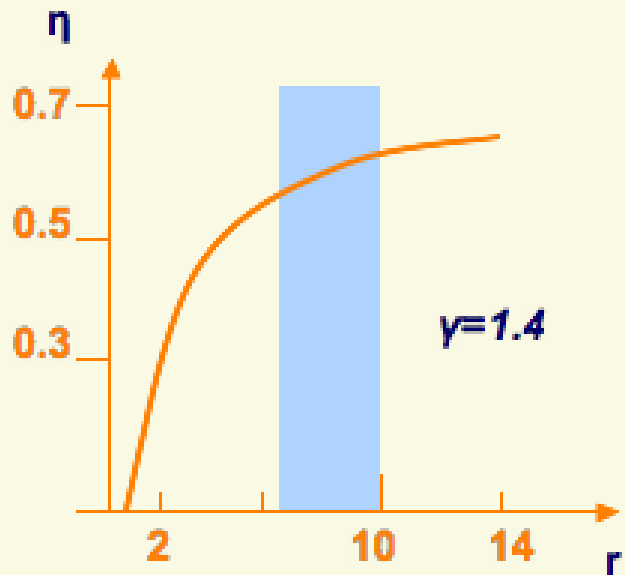
Οι διεργασίες $1 \rightarrow 2$ και $3 \rightarrow 4$ είναι ισεντροπικές και ισόχωρες:

$$v_2 = v_3, \quad v_4 = v_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Έτσι καταλήγουμε: $\eta_{th,Otto} = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - r^{1-k}$

με $r = V_{max}/V_{min}$ και $k = C_p/C_v$

$$\eta_{th,Otto} = 1 - r^{1-k} \Rightarrow \eta_{Otto} \text{ αυξάνει με το } r \text{ και με το } k$$



(όπου $\gamma \rightarrow k$)

Η θερμική απόδοση των πραγματικών μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα είναι μικρότερη της αντίστοιχης του ιδανικού κύκλου Otto.

Παράδειγμα : κύκλος Otto

- Χωρίς την παραδοχή σταθερών C_p , και C_v

Παράδειγμα : κύκλος Otto

- Χωρίς την παραδοχή σταθερών C_p , και C_v
- Κύκλος Otto αέρα με λόγο συμπίεσης 8, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 17°C , $q_{in} = 800 \text{ kJ/kg}$.

Παράδειγμα : κύκλος Otto

- Χωρίς την παραδοχή σταθερών C_p , και C_v
- Κύκλος Otto αέρα με λόγο συμπίεσης 8, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 17°C , $q_{in} = 800 \text{ kJ/kg}$.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια

Παράδειγμα : κύκλος Otto

- Χωρίς την παραδοχή σταθερών C_p , και C_v
- Κύκλος Otto αέρα με λόγο συμπίεσης 8, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 17°C , $q_{in} = 800 \text{ kJ/kg}$.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια
- κατάσταση 1 : $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $T_1 = 290 \text{ K}$
 $\Rightarrow$ (Πίνακας A-17) $u_1 = 206.91 \text{ kJ/kg}$, $v_{r1} = 676.1$

Παράδειγμα : κύκλος Otto

- Χωρίς την παραδοχή σταθερών C_p , και C_v
- Κύκλος Otto αέρα με λόγο συμπίεσης 8, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 17°C , $q_{in} = 800 \text{ kJ/kg}$.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια
- κατάσταση 1 : $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $T_1 = 290 \text{ K}$
 $\Rightarrow$ (Πίνακας A-17) $u_1 = 206.91 \text{ kJ/kg}$, $v_{r1} = 676.1$
- κατάσταση 2 :

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{8} \quad \Rightarrow \quad v_{r2} \Rightarrow T_2 = 652.4 \text{ K} \quad u_2 = 475.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \Rightarrow P_2 = 1799.7 \text{ kPa}$$

Παράδειγμα : κύκλος Otto (συν.)

- κατάσταση 3 : $v_3 = v_2 = 8v_1$

$$u_3 = u_2 + q_{in} = 1275.11 \text{ kJ/kg} \quad \Rightarrow \quad T_3 = 1575 \text{ K}, \quad v_{r3} = 6.1$$

$$P_3 = P_2 \frac{T_3 v_2}{T_2 v_3} = 4.35 \text{ MPa}$$

Παράδειγμα : κύκλος Otto (συν.)

- κατάσταση 3 : $v_3 = v_2 = 8v_1$

$$u_3 = u_2 + q_{in} = 1275.11 \text{ kJ/kg} \Rightarrow T_3 = 1575 \text{ K}, \quad v_{r3} = 6.1$$

$$P_3 = P_2 \frac{T_3 v_2}{T_2 v_3} = 4.35 \text{ MPa}$$

- κατάσταση 4 : $\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_2} = 8$

$$\Rightarrow v_{r4} = 8v_{r3} = 48.86 \Rightarrow T_4 = 795.6 \text{ K} \quad u_4 = 588.7 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{out} = u_4 - u_1 = 418.17 \text{ kJ/kg}$$

Παράδειγμα : κύκλος Otto (συν.)

- κατάσταση 3 : $v_3 = v_2 = 8v_1$

$$u_3 = u_2 + q_{in} = 1275.11 \text{ kJ/kg} \Rightarrow T_3 = 1575 \text{ K}, \quad v_{r3} = 6.1$$

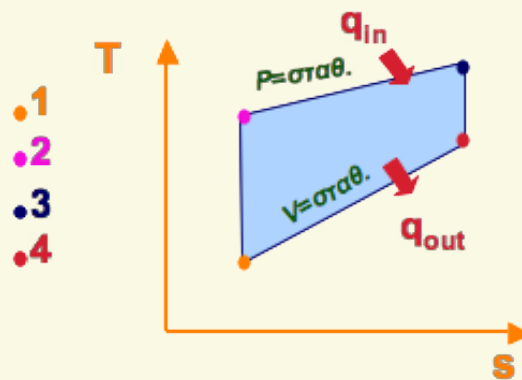
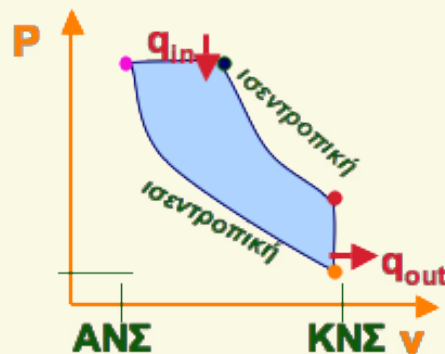
$$P_3 = P_2 \frac{T_3 v_2}{T_2 v_3} = 4.35 \text{ MPa}$$

- κατάσταση 4 : $\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_2} = 8$

$$\Rightarrow v_{r4} = 8v_{r3} = 48.86 \Rightarrow T_4 = 795.6 \text{ K} \quad u_4 = 588.7 \text{ kJ/kg}$$

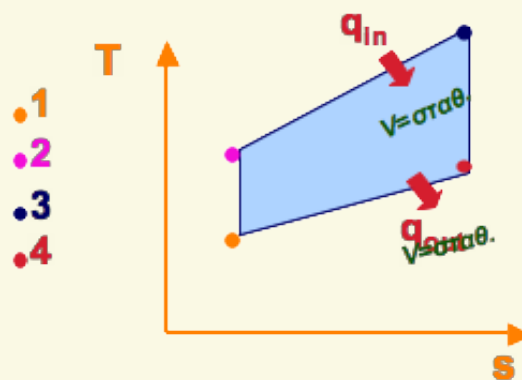
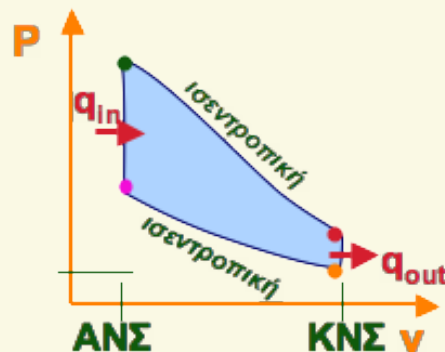
$$q_{out} = u_4 - u_1 = 418.17 \text{ kJ/kg}$$

- απόδοση κύκλου : $\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 0.523 \text{ ή } 52.3 \%$



Diesel

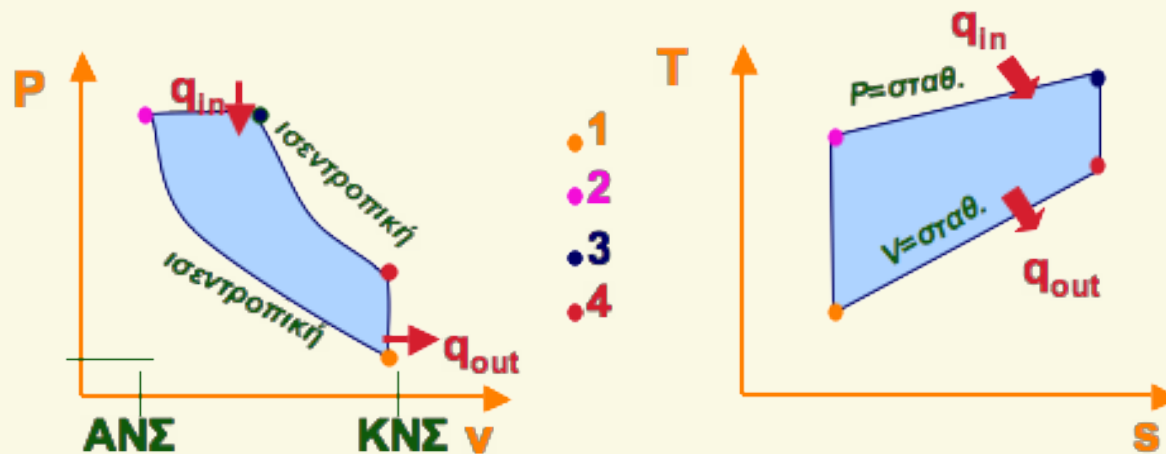
- 1 → 2 : ισεντροπική συμπίεση
- 2 → 3 : ισόχωρη θέρμανση (Q_H)
- 3 → 4 : ισεντροπική εκτόνωση
- 4 → 1 : ισόχωρη ψύξη ($-Q_L$)



Otto

- 1 → 2 : ισεντροπική συμπίεση
- 2 → 3 : ισόχωρη θέρμανση (Q_H)
- 3 → 4 : ισεντροπική εκτόνωση
- 4 → 1 : ισόχωρη ψύξη ($-Q_L$)

Ιδανικός κύκλος Diesel



- 1 → 2: ισεντροπική συμπίεση
- 2 → 3: ισοβαρής θέρμανση (Q_H)
- 3 → 4: ισεντροπική εκτόνωση
- 4 → 1: ισόχωρη ψύξη ($-Q_L$)

$$P_3 = P_2 \quad \& \quad v_1 = v_4$$

Αν έχουμε σταθερές C_p και C_v :

$$q_{in} = P_2(v_3 - v_2) + u_3 - u_2 = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{Diesel} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{Diesel} = \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{kT_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - r^{1-k} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

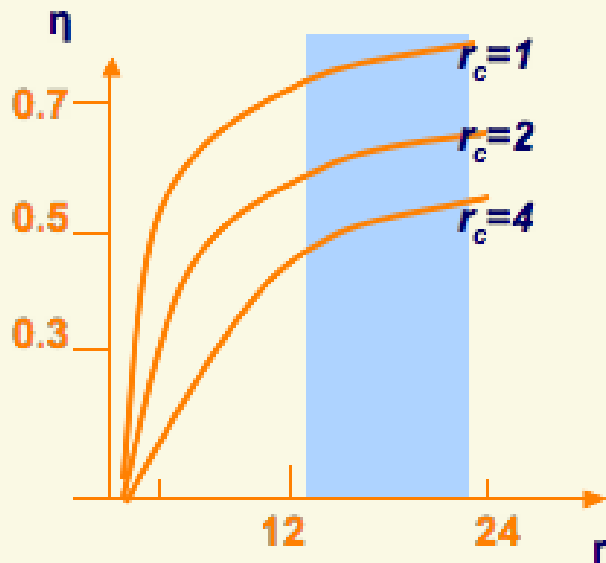
$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad r = \frac{v_1}{v_2} \quad r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

r_c είναι ο **λόγος αποκοπής**, ο λόγος των όγκων του αερίου στον κύλινδρο πριν και μετά την διεργασία καύσης

Για ίδιο λόγο συμπίεσης r :

$$\eta_{Otto} = 1 - r^{1-k} > 1 - r^{1-k} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] = \eta_{Diesel}$$

δηλ. οι μηχανές Otto έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τις μηχανές Diesel.



Στην πράξη επιτυγχάνουμε καλύτερους λόγους συμπίεσης, r , στις Diesel από ό,τι στις Otto και η τελική απόδοση είναι μεγαλύτερη!

Βενζινοκινητήρες: απόδοση 25-30 %

Πετρελαιοκινητήρες: απόδοση 35-40 %

$r_c = 1$ αντιστοιχεί σε μηχανή Otto

Παράδειγμα : κύκλος Diesel

- Κύκλος Diesel αέρα, σταθερές C_p , C_v , με λόγο συμπίεσης 18, λόγο αποκοπής 2, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 27° C , αρχικός όγκος 0.002 m³.

Παράδειγμα : κύκλος Diesel

- Κύκλος Diesel αέρα, σταθερές C_p , C_v , με λόγο συμπίεσης 18, λόγο αποκοπής 2, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 27° C , αρχικός όγκος 0.002 m³.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια, $C_p = 1.005$ kJ/kgK , $C_v = 0.718$ kJ/kgK , $k = 1.4$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel

- Κύκλος Diesel αέρα, σταθερές C_p , C_v , με λόγο συμπίεσης 18, λόγο αποκοπής 2, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 27° C , αρχικός όγκος 0.002 m³.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια, $C_p = 1.005$ kJ/kgK , $C_v = 0.718$ kJ/kgK , $k = 1.4$
- κατάσταση 1 : $P_1 = 100$ kPa, $T_1 = 300$ K , $V_1 = 0.002$ m³
Μάζα = $m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{100 \times 0.002}{0.287 \times 300} = 0.0023$ kg

Παράδειγμα : κύκλος Diesel

- Κύκλος Diesel αέρα, σταθερές C_p , C_v , με λόγο συμπίεσης 18, λόγο αποκοπής 2, ελαχιστη πίεση 100 kPa και θερμοκρ. 27° C , αρχικός όγκος 0.002 m³.
- Παραδοχές: Πρότυπο αέρα, αμελητέα κινητική & δυναμική ενέργεια, $C_p = 1.005$ kJ/kgK , $C_v = 0.718$ kJ/kgK , $k = 1.4$
- κατάσταση 1 : $P_1 = 100$ kPa, $T_1 = 300$ K , $V_1 = 0.002$ m³
Μάζα = $m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{100 \times 0.002}{0.287 \times 300} = 0.0023$ kg
- κατάσταση 2 : $V_2 = \frac{V_1}{18} = 0.00011$ m³

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = T_1 18^{0.4} = 953 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = P_1 18^{1.4} = 5.72 \text{ MPa}$$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- κατάσταση 3 : $P_3 = P_2$, $V_3 = r_c V_2 = 2 \times V_2 = 0.00022 \text{ m}^3$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_2 r_c = 1906 \text{ K}$$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- κατάσταση 3 : $P_3 = P_2$, $V_3 = r_c V_2 = 2 \times V_2 = 0.00022 \text{ m}^3$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_2 r_c = 1906 \text{ K}$$

- κατάσταση 4 : $V_4 = V_1$ $T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = 788 \text{ K}$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k = 260 \text{ kPa}$$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- κατάσταση 3 : $P_3 = P_2$, $V_3 = r_c V_2 = 2 \times V_2 = 0.00022 \text{ m}^3$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_2 r_c = 1906 \text{ K}$$

- κατάσταση 4 : $V_4 = V_1$ $T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = 788 \text{ K}$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k = 260 \text{ kPa}$$

- $Q_{in} : 2 \rightarrow 3$ ισοβαρής $\Rightarrow Q_{in} = m(h_3 - h_2) = mC_p(T_3 - T_2) = 2.2 \text{ kJ}$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- κατάσταση 3 : $P_3 = P_2$, $V_3 = r_c V_2 = 2 \times V_2 = 0.00022 \text{ m}^3$

$$T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_2 r_c = 1906 \text{ K}$$

- κατάσταση 4 : $V_4 = V_1$ $T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = 788 \text{ K}$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k = 260 \text{ kPa}$$

- $Q_{in} : 2 \rightarrow 3$ ισοβαρής $\Rightarrow Q_{in} = m(h_3 - h_2) = mC_p(T_3 - T_2) = 2.2 \text{ kJ}$
- $Q_{out} : 4 \rightarrow 1$ ισόχωρη $\Rightarrow Q_{out} = m(u_4 - u_1) = mC_v(T_4 - T_1) = 0.806 \text{ kJ}$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- έργο ανά κύκλο : $W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = 1.394 \text{ kJ}$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- έργο ανά κύκλο : $W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = 1.394 \text{ kJ}$

- Θερμική απόδοση : $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 0.63$

Ή απο εξίσωση 8-12:

$$\eta_{th} = 1 - r^{1-k} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] = 0.63$$

Παράδειγμα : κύκλος Diesel (συν.)

- έργο ανά κύκλο : $W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = 1.394 \text{ kJ}$

- Θερμική απόδοση : $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 0.63$

Ή απο εξίσωση 8-12:

$$\eta_{th} = 1 - r^{1-k} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] = 0.63$$

- Μέση αποτελ. πίεση : $MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{W_{net}}{V_1 - V_2} = 783 \text{ kPa}$

Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα

- ☐ Otto
- ☐ Diesel

Μηχανές εσωτερικής καύσης

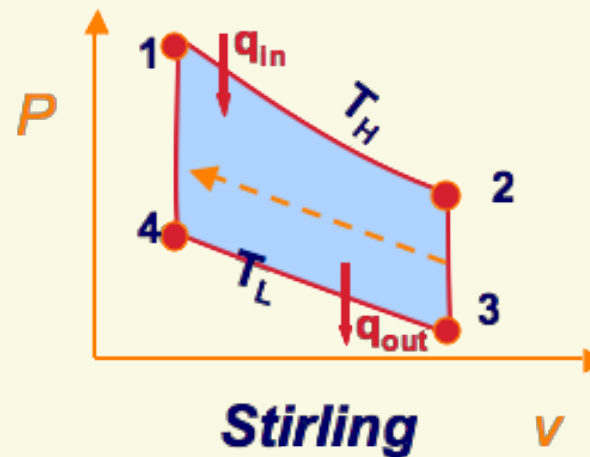
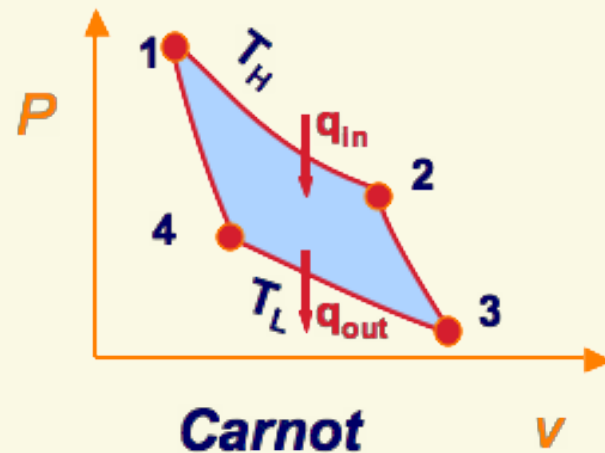
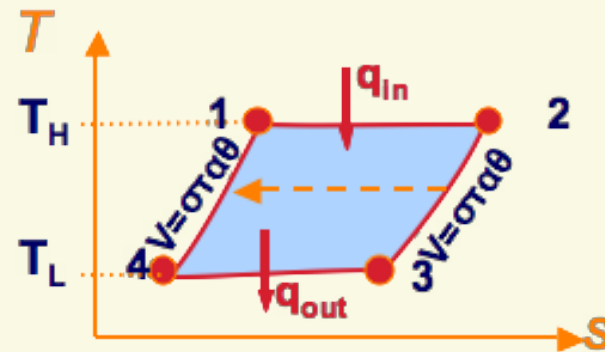
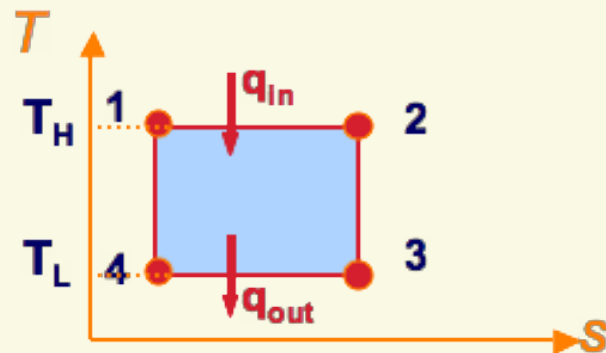
Αέρας + καύσιμο $\rightarrow$ προϊόντα καύσης

Ιδανικός κύκλος : Εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες

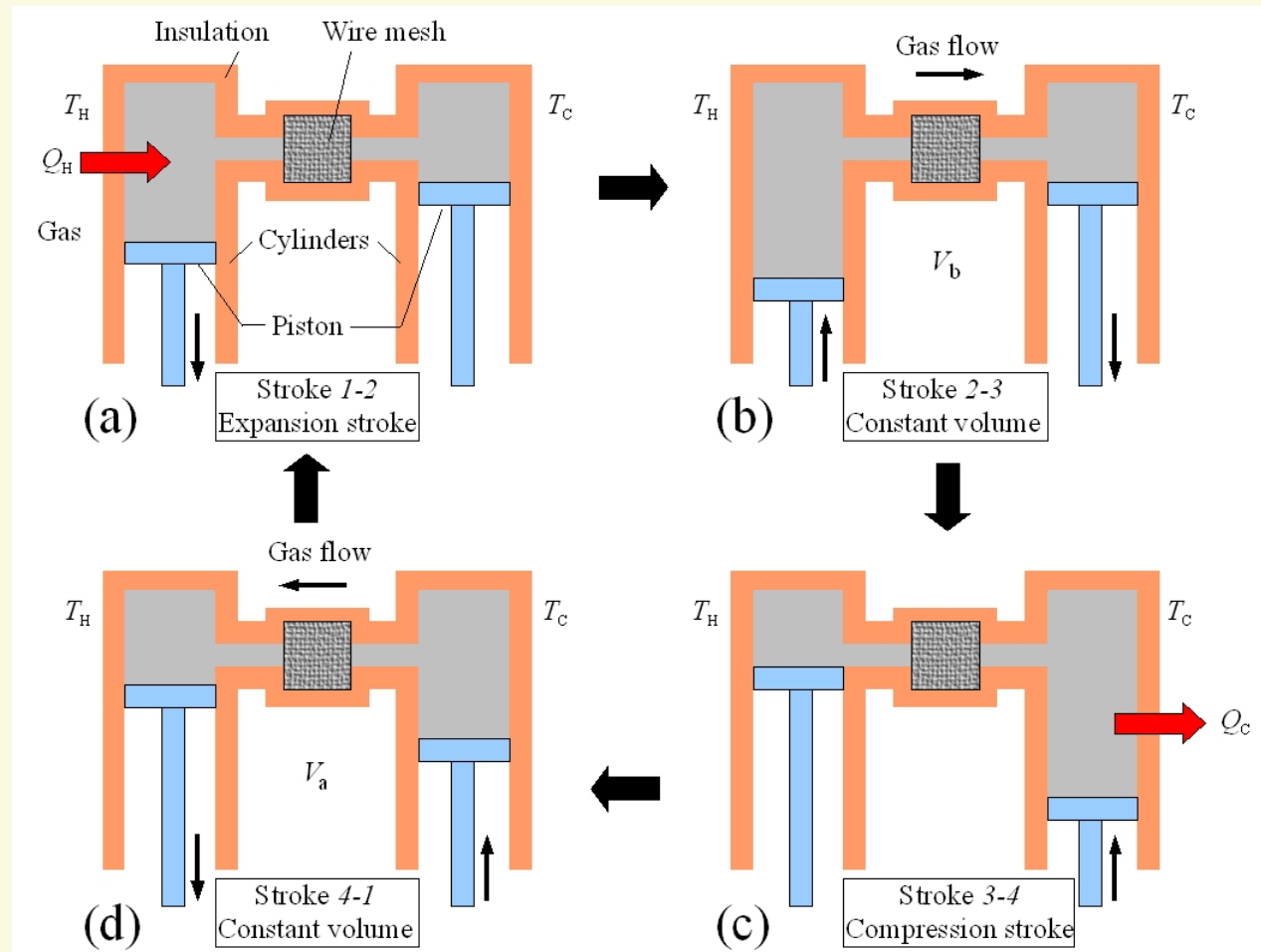
Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα

- ☐ Otto
☐ Diesel
 - ☐ Stirling
☐ Ericsson
- Μηχανές εσωτερικής καύσης
Αέρας + καύσιμο → προϊόντα καύσης
Ιδανικός κύκλος : Εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες
- Μηχανές εξωτερικής καύσης
Προσθήκη θερμότητας από εξωτερική πηγή
Ιδανικός κύκλος : Ολικά αντιστρεπτές διεργασίες

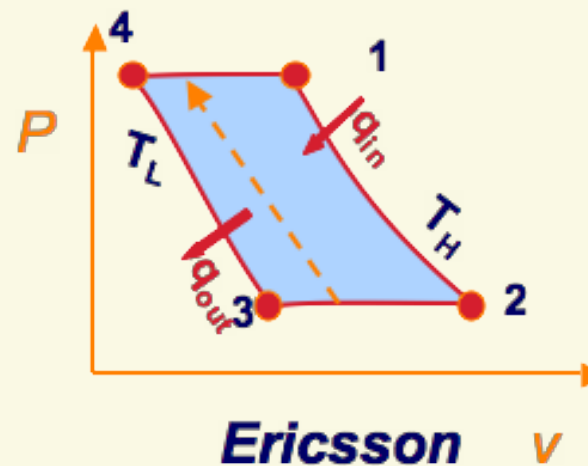
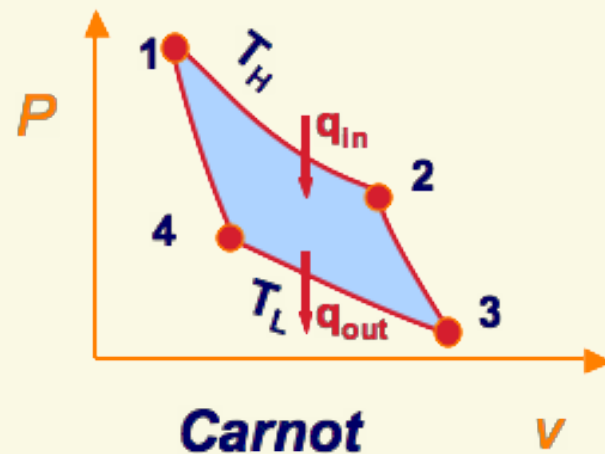
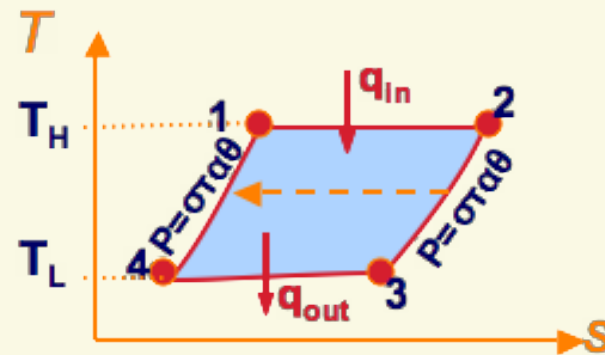
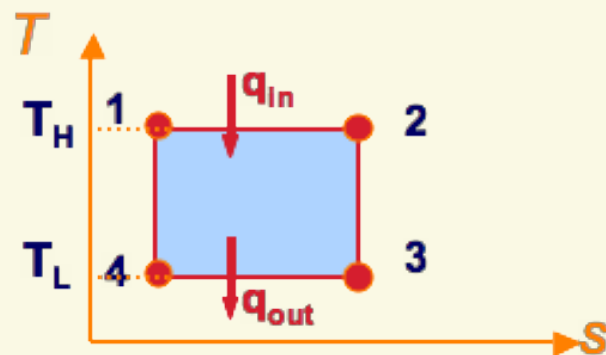
Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα



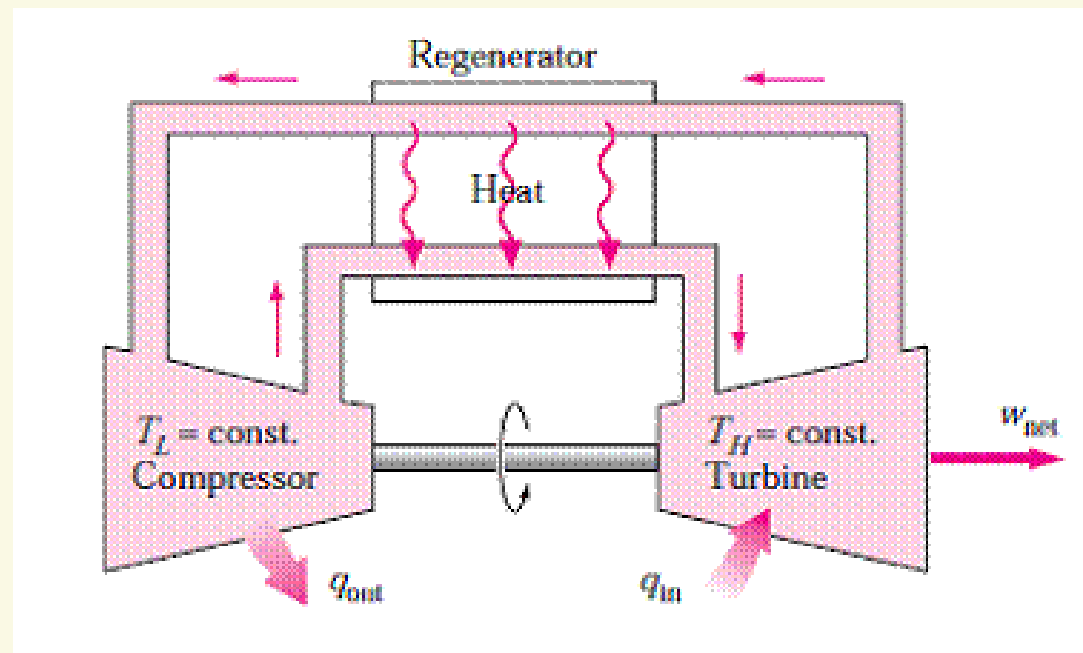
Κύκλος Stirling



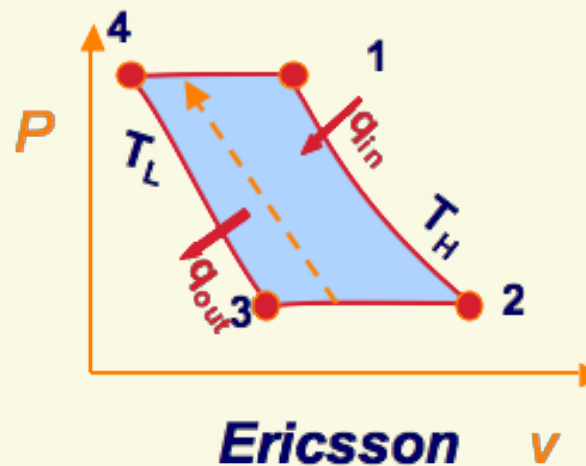
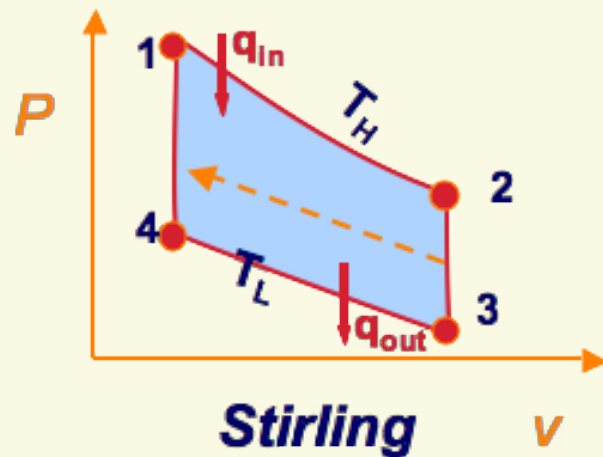
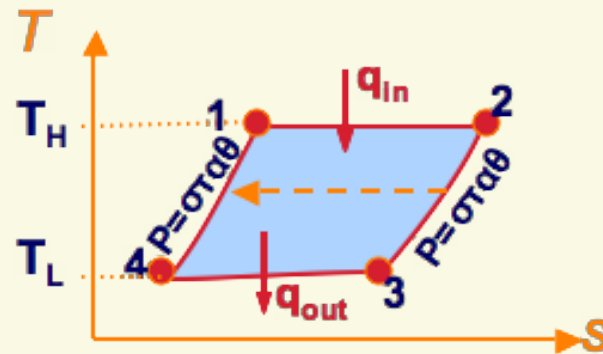
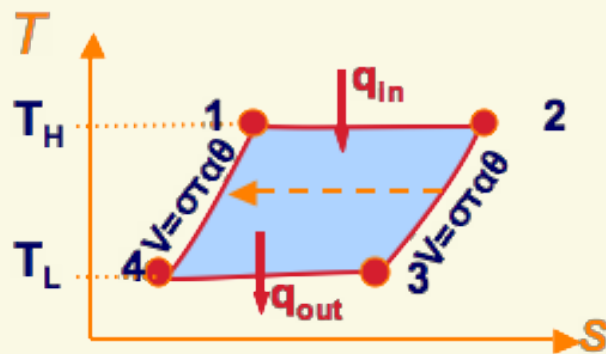
Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα



Κύκλος Ericsson



Σύγκριση κύκλων Stirling και Ericsson



Κύκλοι Stirling και Ericsson

Στην πράξη δύσκολο να πραγματοποιηθούν!

(μεταφορά θερμότητας κατά μήκος διαφορικής θερμοκρασιακής διαφοράς, dT !)

Μηχανές εξωτερικής καύσης:

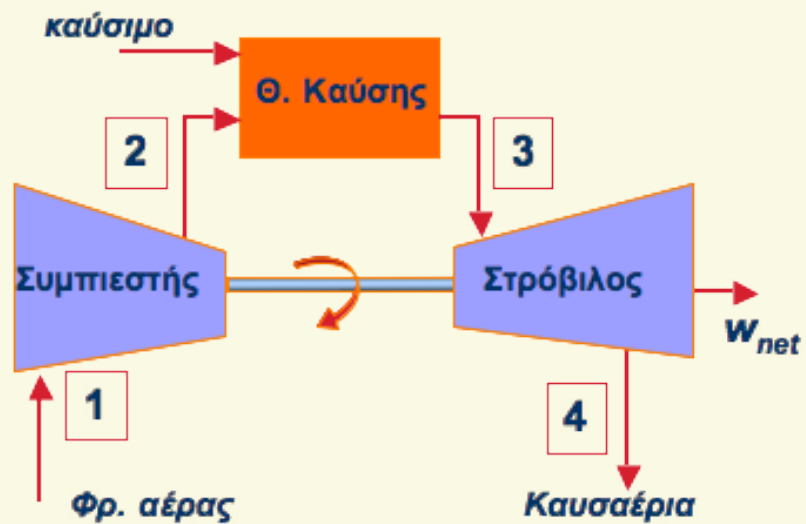
- δυνατότητα ποικιλίας καυσίμων!
- πληρέστερη καύση
- κλειστό κύκλωμα ρευστού λειτουργίας: επιλογή με βάση τη θερμική αγωγιμότητα κλπ.

Η αναγέννηση μπορεί να αυξήσει την απόδοση!

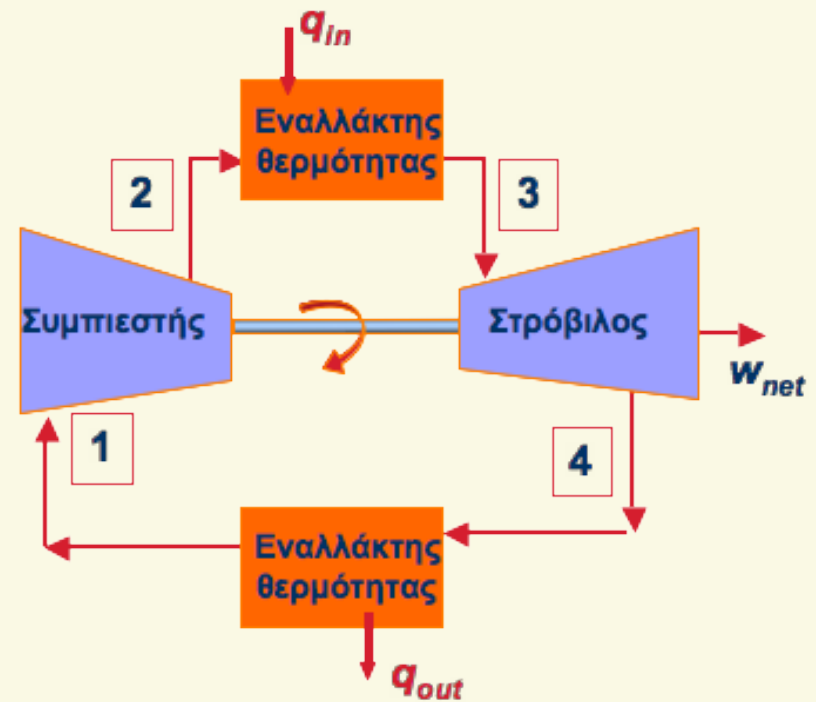
Κύκλοι παραγωγής ισχύος με αέρα

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Otto• Diesel | | Μηχανές εσωτερικής καύσης
Αέρας + καύσιμο → προϊόντα καύσης
Ιδανικός κύκλος : Εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες |
| <ul style="list-style-type: none">• Stirling• Ericsson | | Μηχανές εξωτερικής καύσης
Προσθήκη θερμότητας από εξωτερική πηγή
Ιδανικός κύκλος : Ολικά αντιστρεπτές διεργασίες |
| <ul style="list-style-type: none">• Brayton | | Αέριοστρόβιλοι |

Κύκλος Brayton

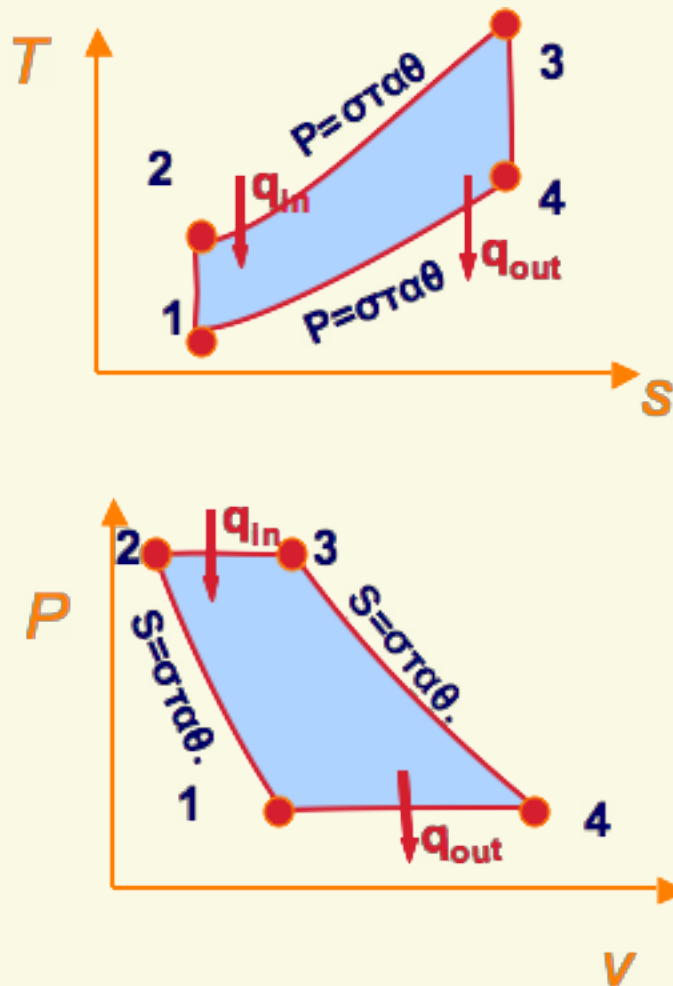


Αεριοστρόβιλος ανοικτού κύκλου



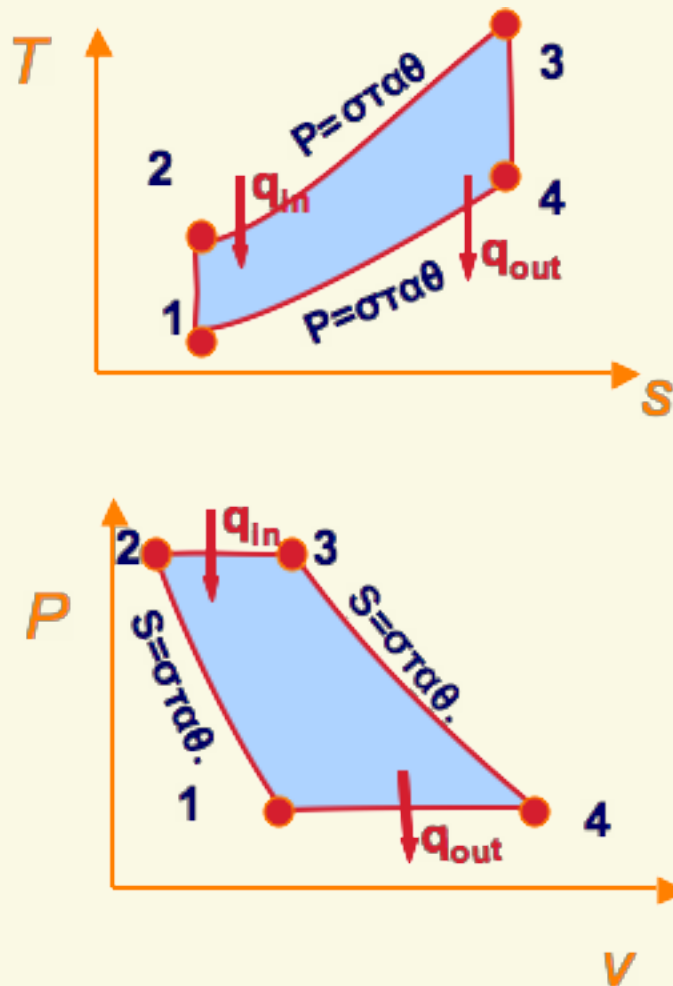
Αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου
(Brayton)

Κύκλος Brayton



- 1 $\rightarrow$ 2: ισεντροπική συμπίεση
- 2 $\rightarrow$ 3: ισοβαρής προσθήκη Q
- 3 $\rightarrow$ 4: ισεντροπική εκτόνωση
- 4 $\rightarrow$ 1: ισοβαρής απόρριψη Q

Κύκλος Brayton



Διεργασίες μόνιμης ροής

$$q_{in} - q_{out} + w_{in} - w_{out} = h_{ex} - h_{in}$$

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

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

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

$$\eta_{Bray} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

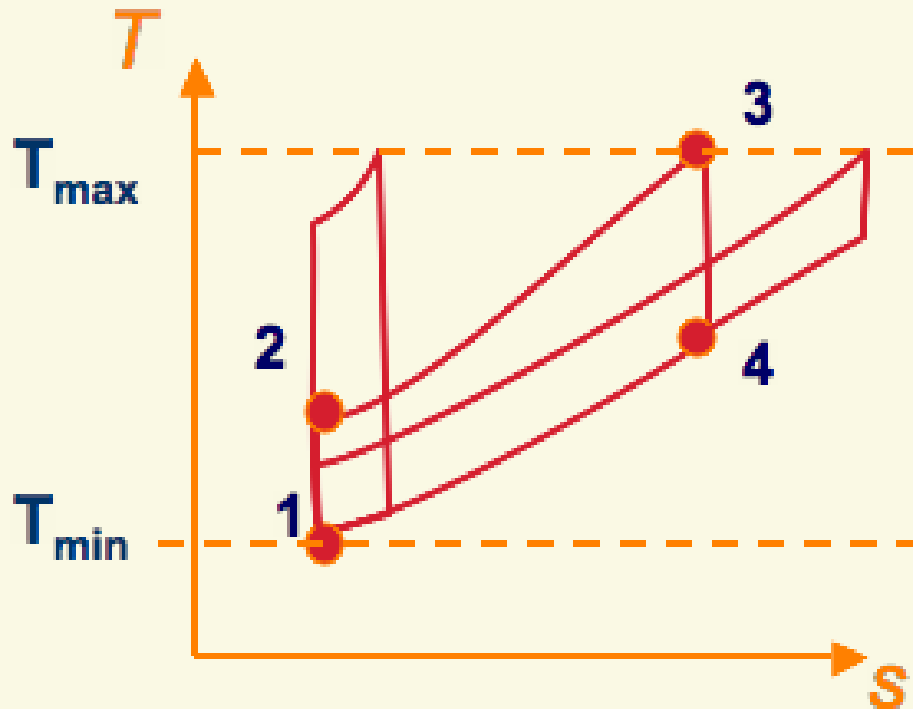
Κύκλος Brayton

$$\eta_{Bray} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$P_2 = P_3, \quad P_4 = P_1 \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}, \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(k-1)/k}$$

$$\eta_{Bray} = 1 - r_p^{-(k-1)/k} \quad \text{με} \quad r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

Κύκλος Brayton

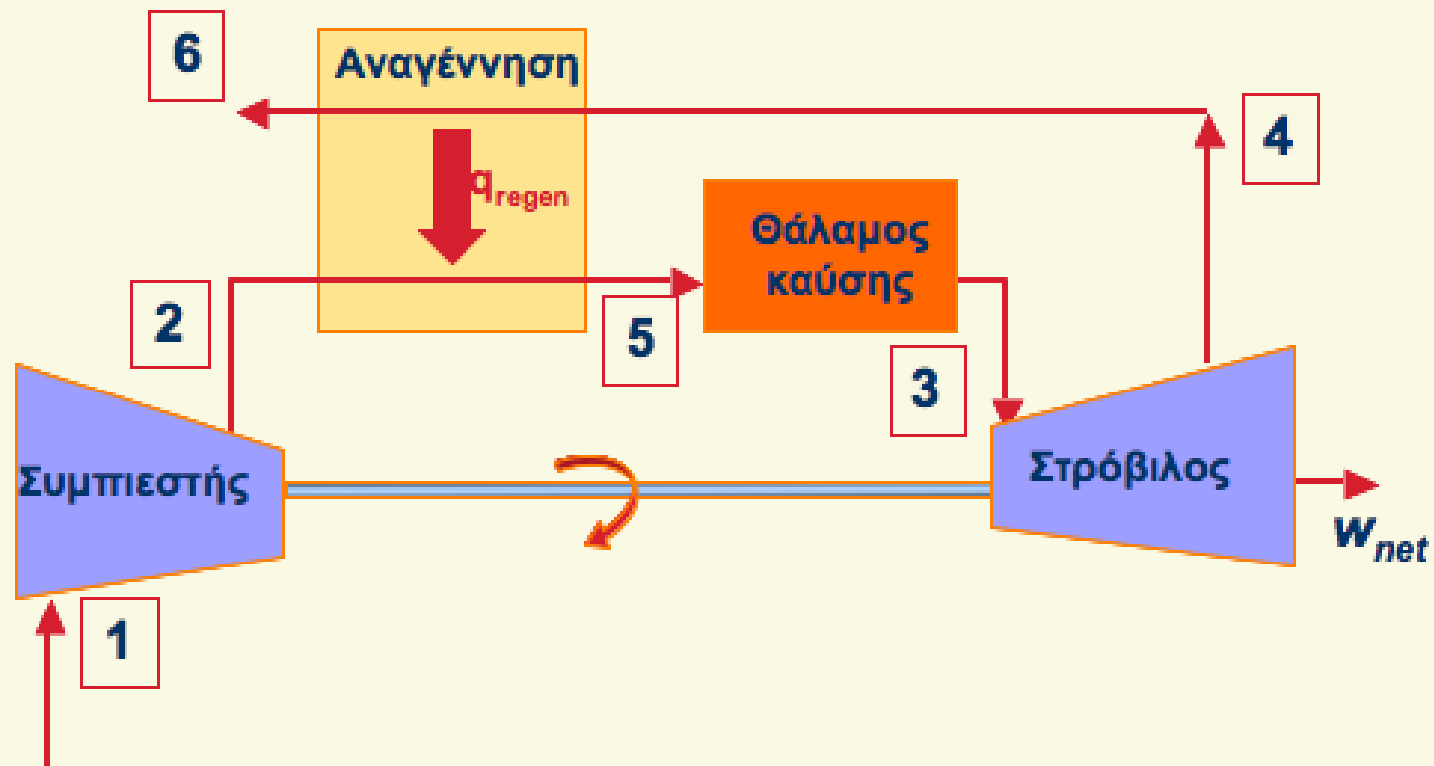


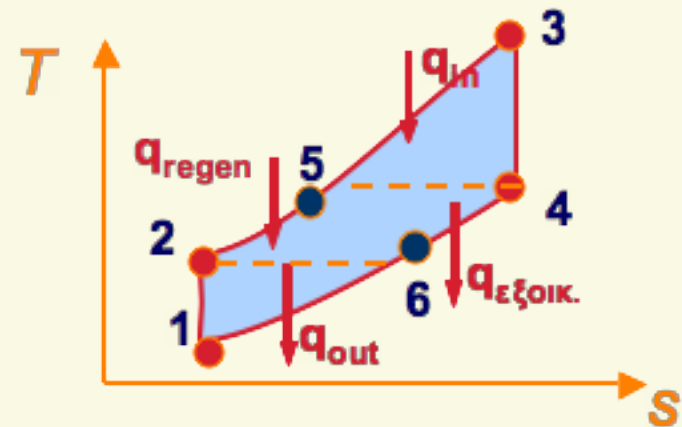
Για δεδομένες T_{max} και T_{min} το καθαρό έργο του κύκλου Brayton αυξάνεται με το λόγο r_p μέχρι μια μέγιστη τιμή για $r_p = (T_{max}/T_{min})^{k/(2(k-1))}$ και μετά μειώνεται.

Ο αέρας στους αεριοστροβίλους χρησιμεύει και ως ψυκτικό.

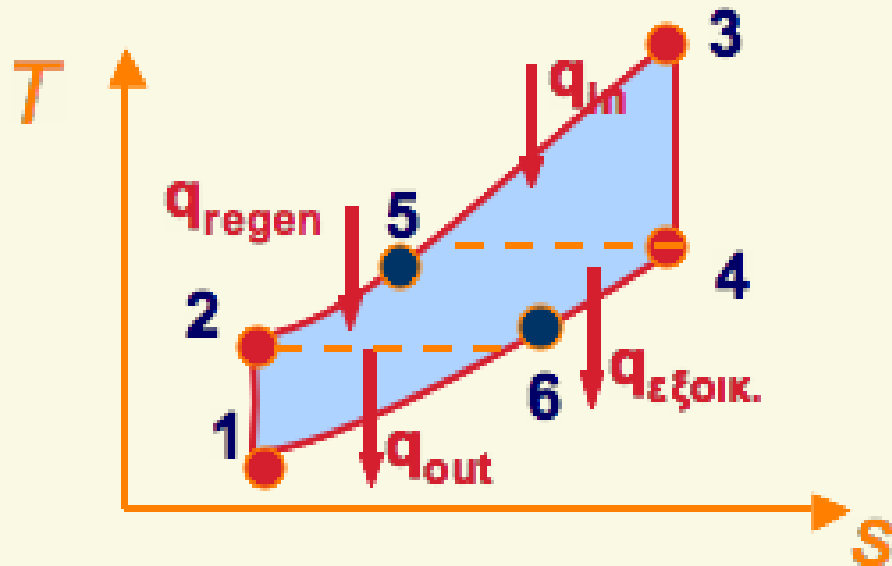
Ο λόγος αέρα - καυσίμου μπορεί να φθάσει το 50!

Κύκλος Brayton με αναγέννηση (προθέρμανση)





Κύκλος Brayton με αναγέννηση (προθέρμανση)



$$q_{regen} = h_5 - h_1$$

$$q_{regen,max} = h_5 - h_2 = h_4 - h_2$$

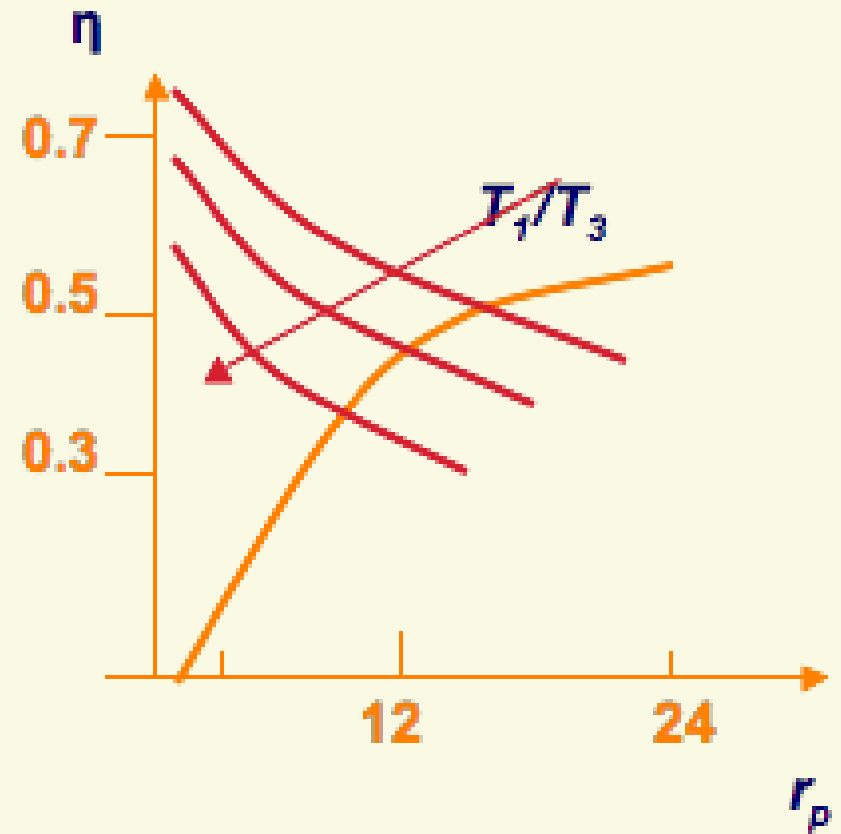
$$\beta = \frac{q_{regen}}{q_{regen,max}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}$$

$$\beta = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}$$

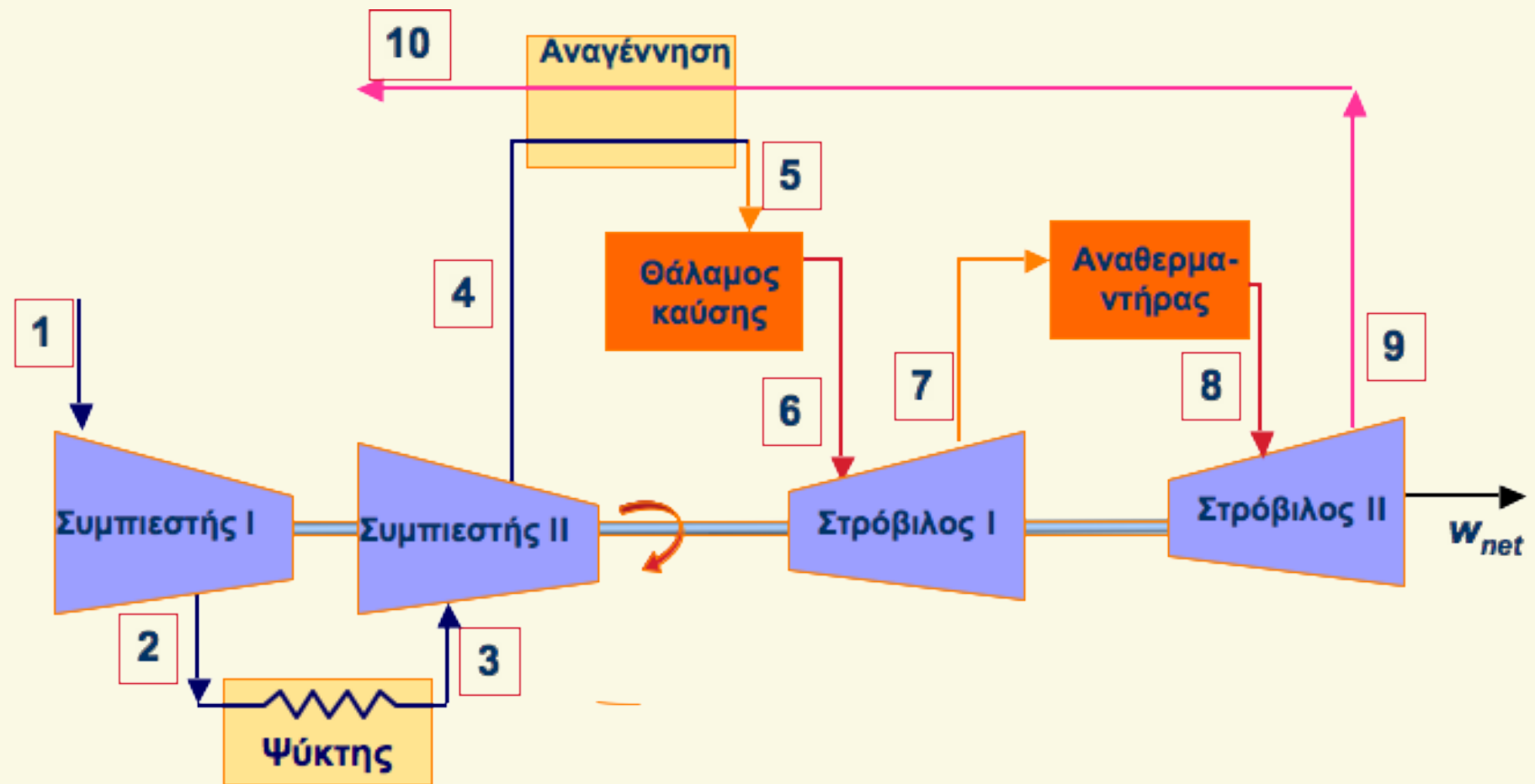
$$\eta_{Bray,regen} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(k-1)/k}$$

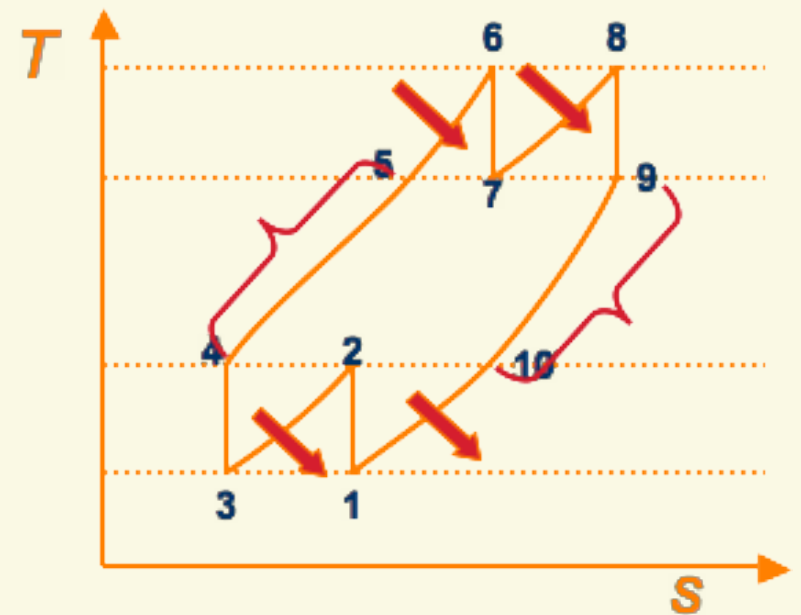
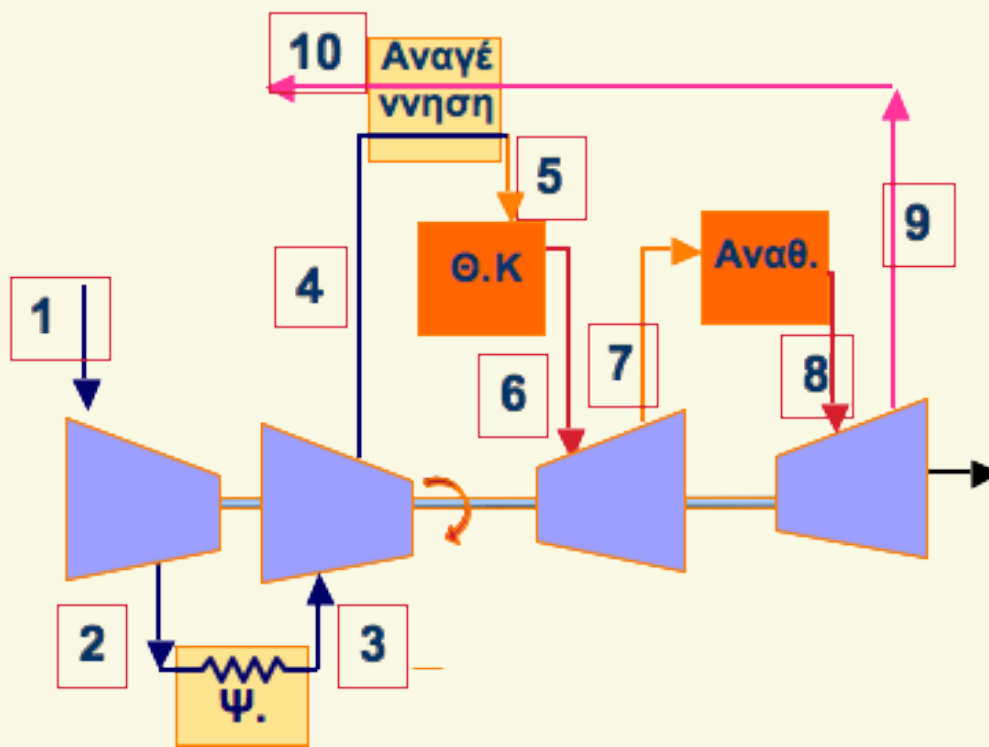
Κύκλος Brayton με αναγέννηση (προθέρμανση)

$$\eta_{Bray,regen} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(k-1)/k}$$



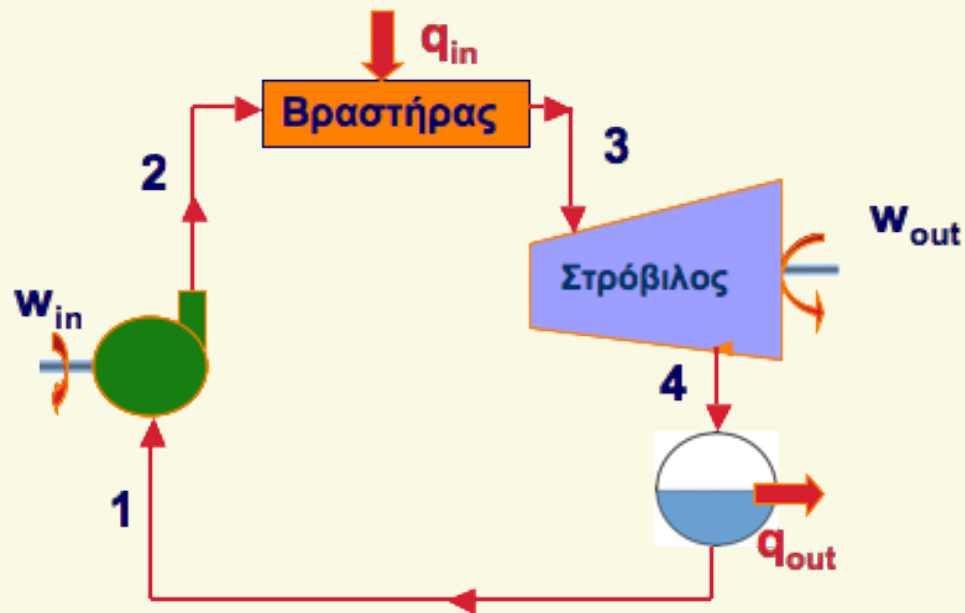
Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναθέρμανση και προθέρμανση (αναγέννηση)



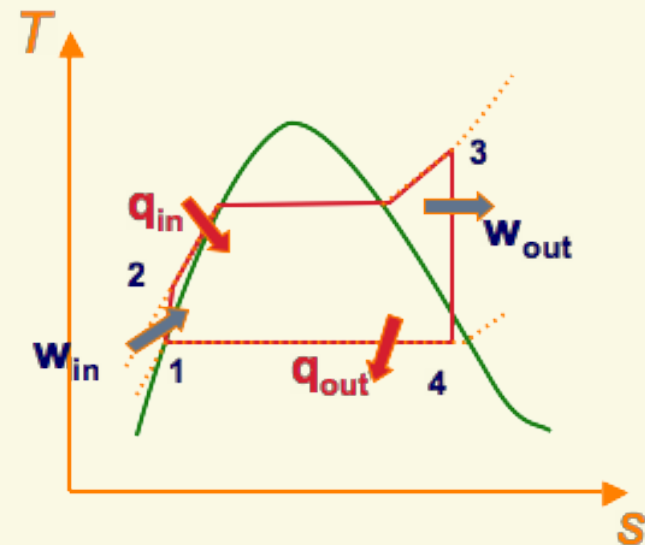


Κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό: Rankine

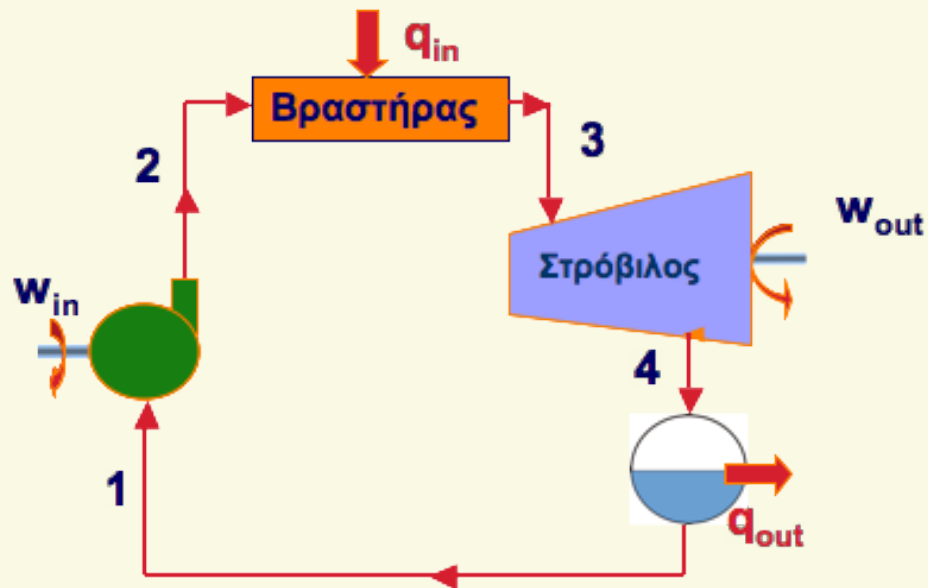
Ιδανικός κύκλος



- 1 $\rightarrow$ 2: ισεντροπική συμπίεση
- 2 $\rightarrow$ 3: ισοβαρής προσθήκη Q_{in}
- 3 $\rightarrow$ 4: ισεντροπική εκτόνωση
- 4 $\rightarrow$ 1: ισοβαρής απόρριψη Q_{out}



Ιδανικός κύκλος Rankine



Μόνιμη κατάσταση:

ΔE_k και ΔE_p αμελητέες

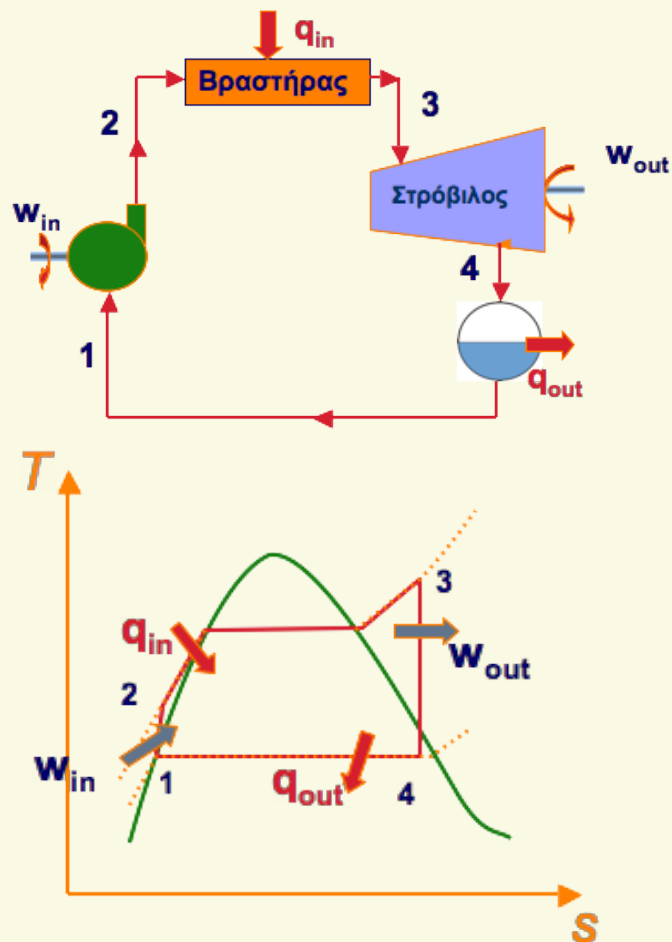
Ισεντροπική (αδιαβατική και
αντιστρεπτή) λειτουργία του

συμπιεστή

Για κάθε συσκευή:

$$q_{in} - q_{out} + w_{in} - w_{out} = h_{out} - h_{in}$$

Ιδανικός κύκλος Rankine



Αντλία ($q=0$): $w_{in} = h_2 - h_1$

ή, πιο απλά: $w_{in} = v_1(P_2 - P_1)$, $v_1 = v_{f@P_1}$

Βραστήρας ($w=0$) : $q_{in} = h_3 - h_2$

Στρόβιλος ($q=0$) : $-w_{out} = h_4 - h_3$

Συμπυκνωτής ($w=0$): $-q_{out} = h_1 - h_4$

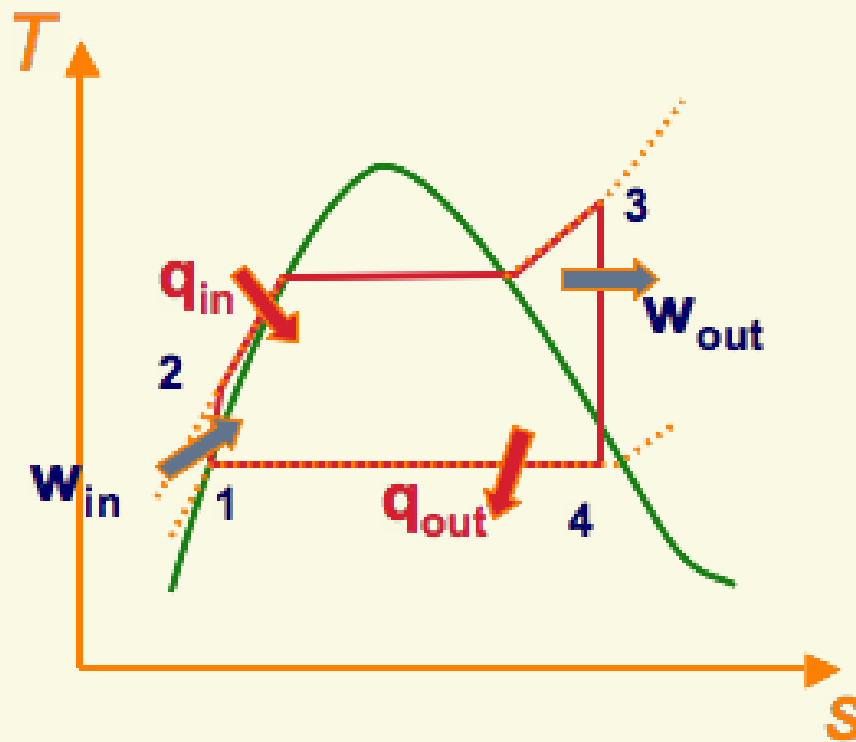
Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{w_{out} - w_{in}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}}$$

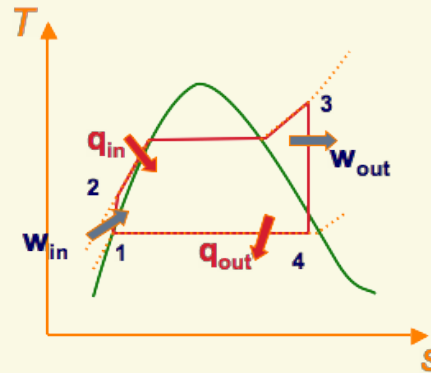
$$\eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Παράδειγμα

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός λειτουργεί με βάση τον κύκλο Rankin μεταξύ πιέσεων 3 MPa και 50 kPa. Η θερμοκρασία του ατμού στην είσοδο του ατμοστροβίλου είναι 300 °C και η παροχή μάζας του ατμού είναι 35 kg/s. Να υπολογισθεί η θερμική απόδοση του κύκλου και η καθαρή παραγόμενη ισχύς.

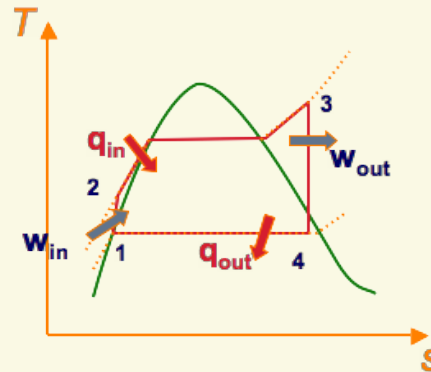


Παράδειγμα Κύκλος Rankine



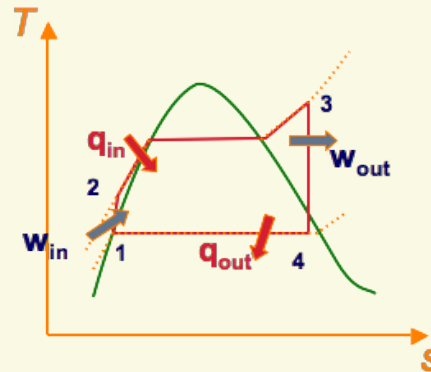
- Ισεντροπικές διεργασίες,

Παράδειγμα Κύκλος Rankine



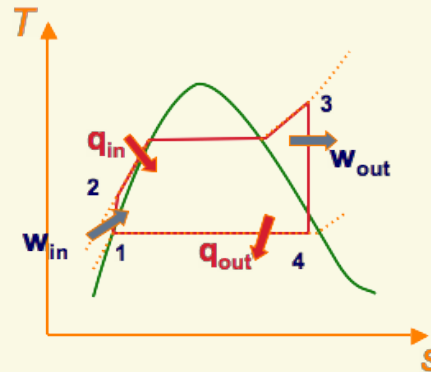
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_f@T_1, v_1 = v_f@T_1$

Παράδειγμα Κύκλος Rankine



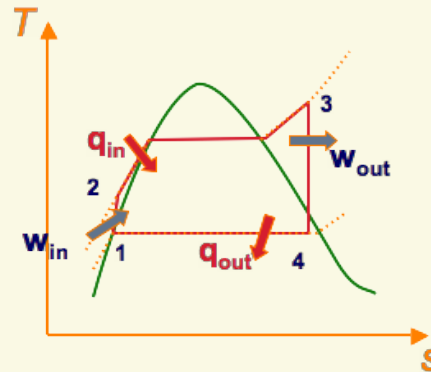
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_f@T_1, v_1 = v_f@T_1$
- (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$

Παράδειγμα Κύκλος Rankine



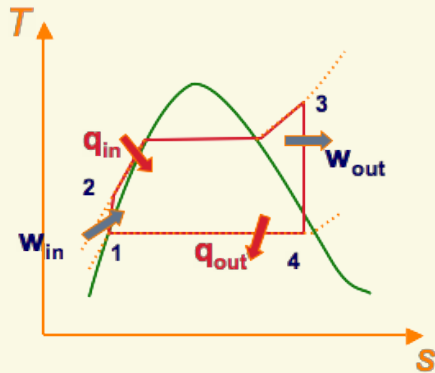
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_f@T_1, v_1 = v_f@T_1$
- (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$
- (3) υπερθ. ατμός: $P_3 = 3 \text{ MPa}, T_3 \Rightarrow h_3, s_3$

Παράδειγμα Κύκλος Rankine

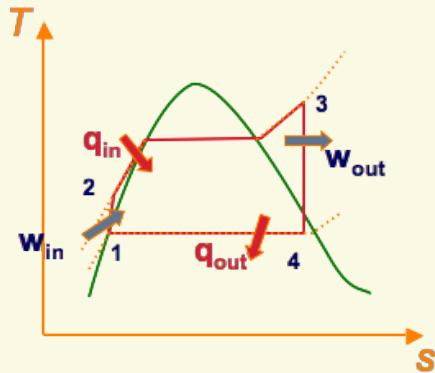


- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_{f@T_1}, v_1 = v_{f@T_1}$
- (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$
- (3) υπερθ. ατμός: $P_3 = 3 \text{ MPa}, T_3 \Rightarrow h_3, s_3$
- (4) κορ. μίγμα $P_4 = 50 \text{ kPa}, s_4 = s_3 \Rightarrow x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_g - s_f}$
 $\Rightarrow h_4 = h_f + x_4 h_{fg}$

Παράδειγμα Κύκλος Rankine

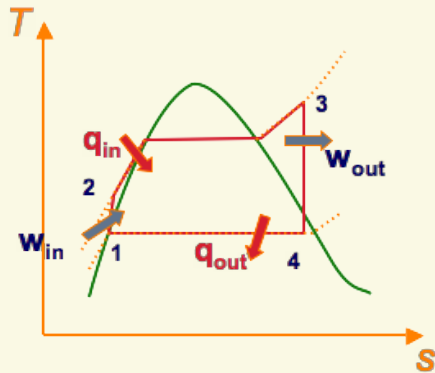


Παράδειγμα Κύκλος Rankine



-
- $\Rightarrow q_{in} = h_3 - h_2 \quad q_{out} = h_4 - h_1$

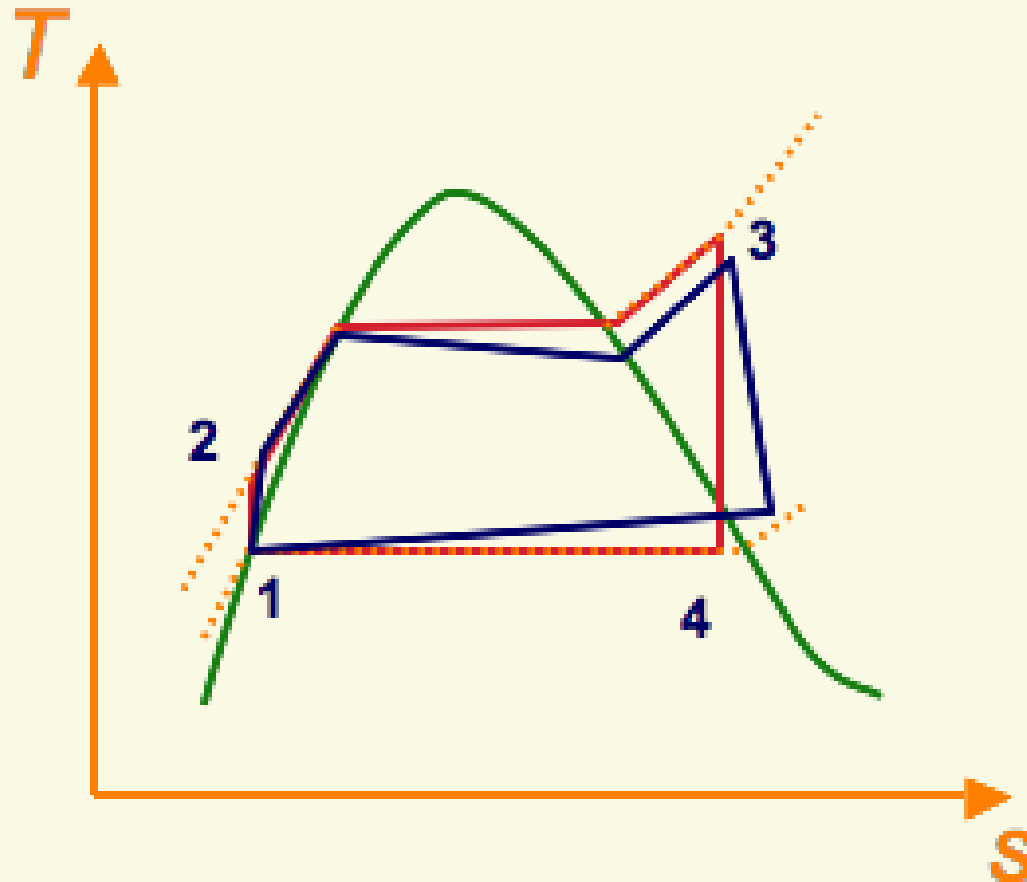
Παράδειγμα Κύκλος Rankine



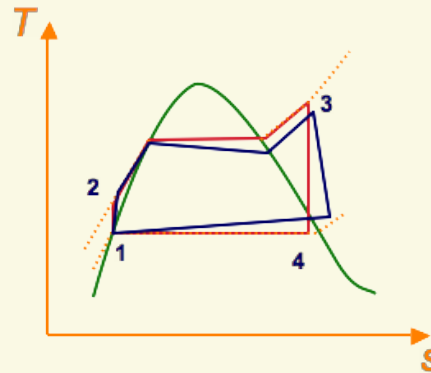
-
- $\Rightarrow q_{in} = h_3 - h_2 \quad q_{out} = h_4 - h_1$
- $\eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad w_{out} = h_3 - h_4 \quad w_{net} = q_{in} - q_{out} = h_3 - h_2 - h_4 + h_1$

$$w_{net} = h_3 - h_4 - v_1(P_2 - P_1)$$

Ιδανικός και πραγματικός κύκλος

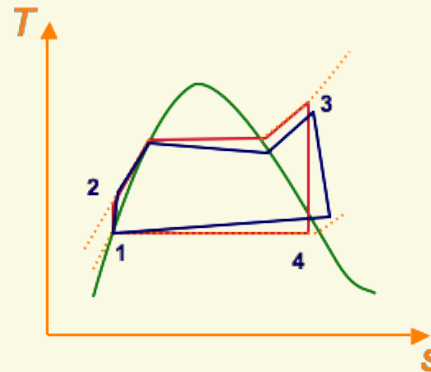


Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine



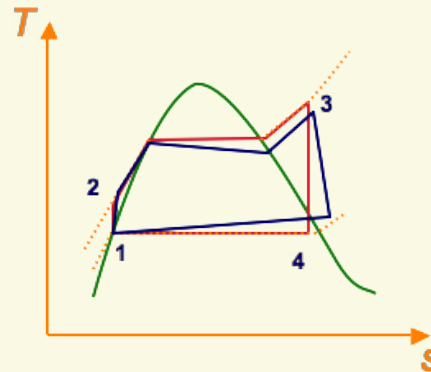
- Ισεντροπικές διεργασίες,

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine



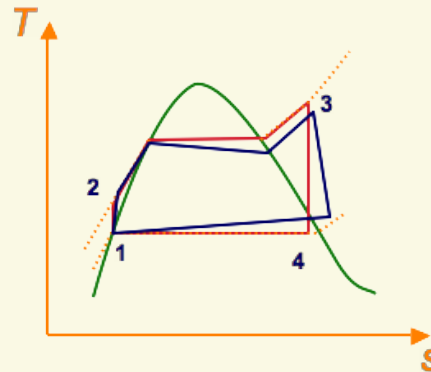
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_{f@T_1}, v_1 = v_{f@T_1}$

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine



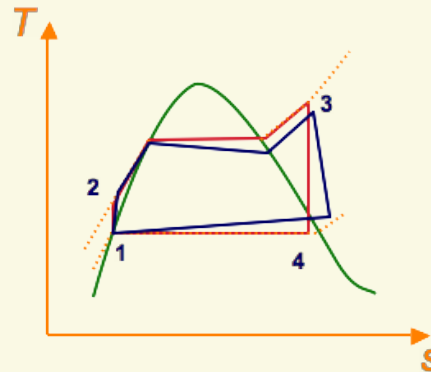
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_f@T_1, v_1 = v_f@T_1$
- (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine



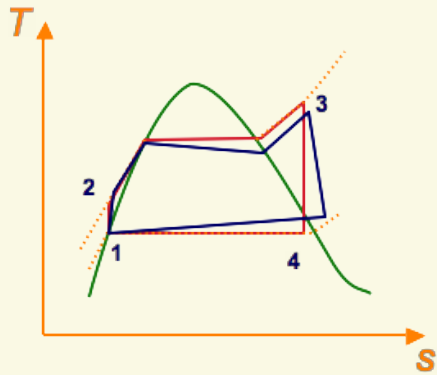
- Ισεντροπικές διεργασίες,
- (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_{f@T_1}, v_1 = v_{f@T_1}$
- (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$
- (3) υπερθ. ατμός: $P_3 = 3 \text{ MPa}, T_3 \Rightarrow h_3, s_3$

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine

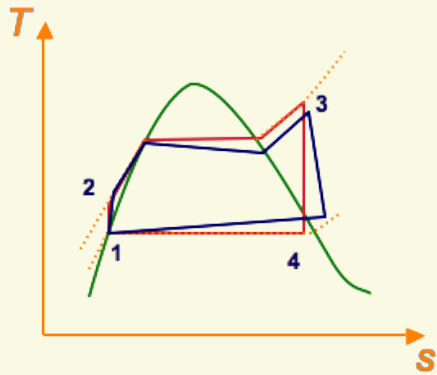


- Ισεντροπικές διεργασίες,
 - (1) κορ. υγρό: $P_1 \Rightarrow T_1, h_1 = h_{f@T_1}, v_1 = v_{f@T_1}$
 - (2) P_2 , αδιαβ. 1-2 $\Rightarrow w_{in} = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + w_{in}$
 - (3) υπερθ. ατμός: $P_3 = 3 \text{ MPa}, T_3 \Rightarrow h_3, s_3$
 - (4) κορ. μίγμα $P_4 = 50 \text{ kPa}, s_4 = s_3 \Rightarrow x_{4s} = \frac{s_4 - s_f}{s_g - s_f}$
- $$\Rightarrow h_{4s} = h_f + x_{4s}h_{fg} \Rightarrow h_{4a} = \eta_{isentr}h_{4s} \Rightarrow x_{4a} (?)$$

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine

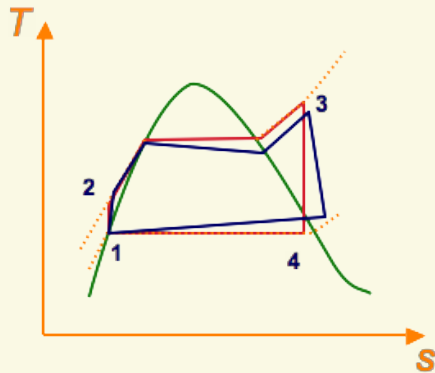


Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine



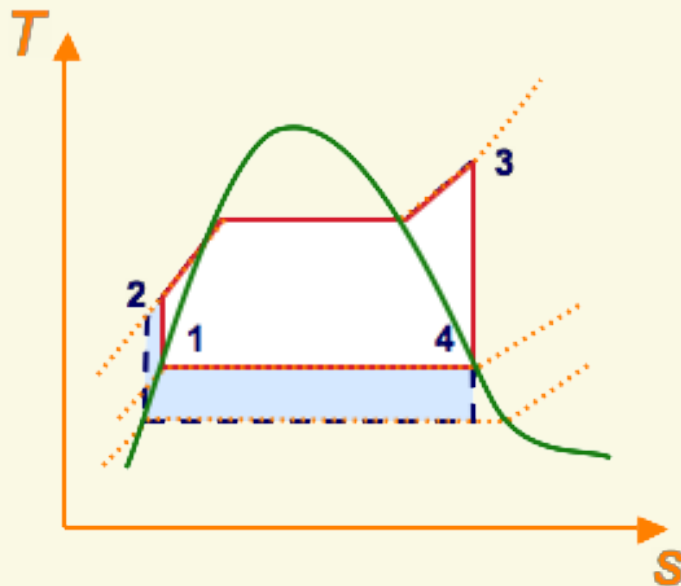
-
- $\Rightarrow q_{in} = h_3 - h_2 \quad q_{out} = h_{4a} - h_1$

Παράδειγμα: πραγματικός κύκλος Rankine

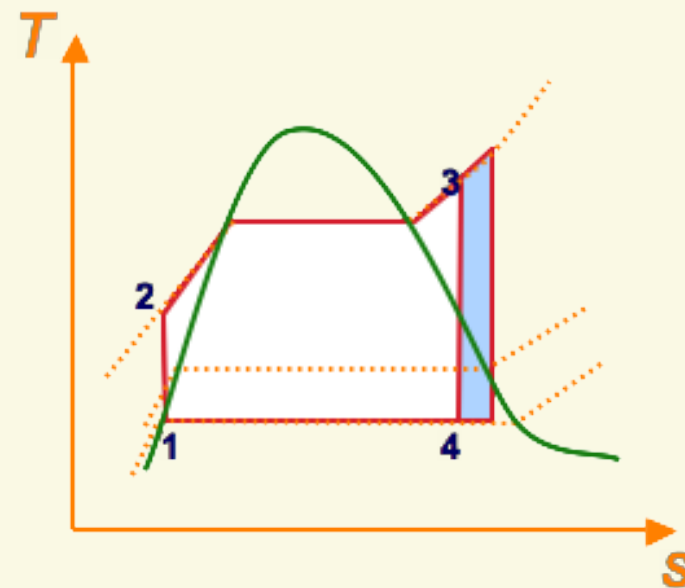


- - $\Rightarrow q_{in} = h_3 - h_2 \quad q_{out} = h_{4a} - h_1$
 - $\eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad w_{out} = h_3 - h_{4a} \quad w_{net} = q_{in} - q_{out} = h_3 - h_2 - h_{4a} + h_1$
- $$w_{net} = h_3 - h_{4a} - v_1(P_2 - P_1)$$

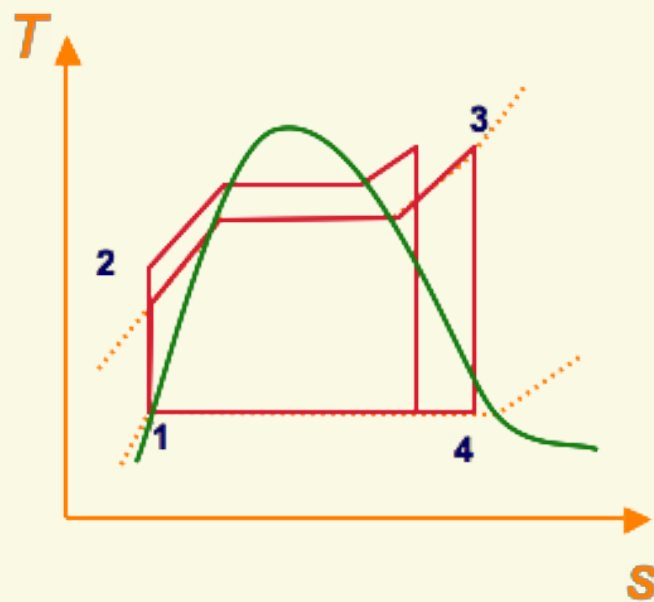
Αύξηση θερμικής απόδοσης κύκλου Rankine



Μείωση της P του συμπυκνωτή

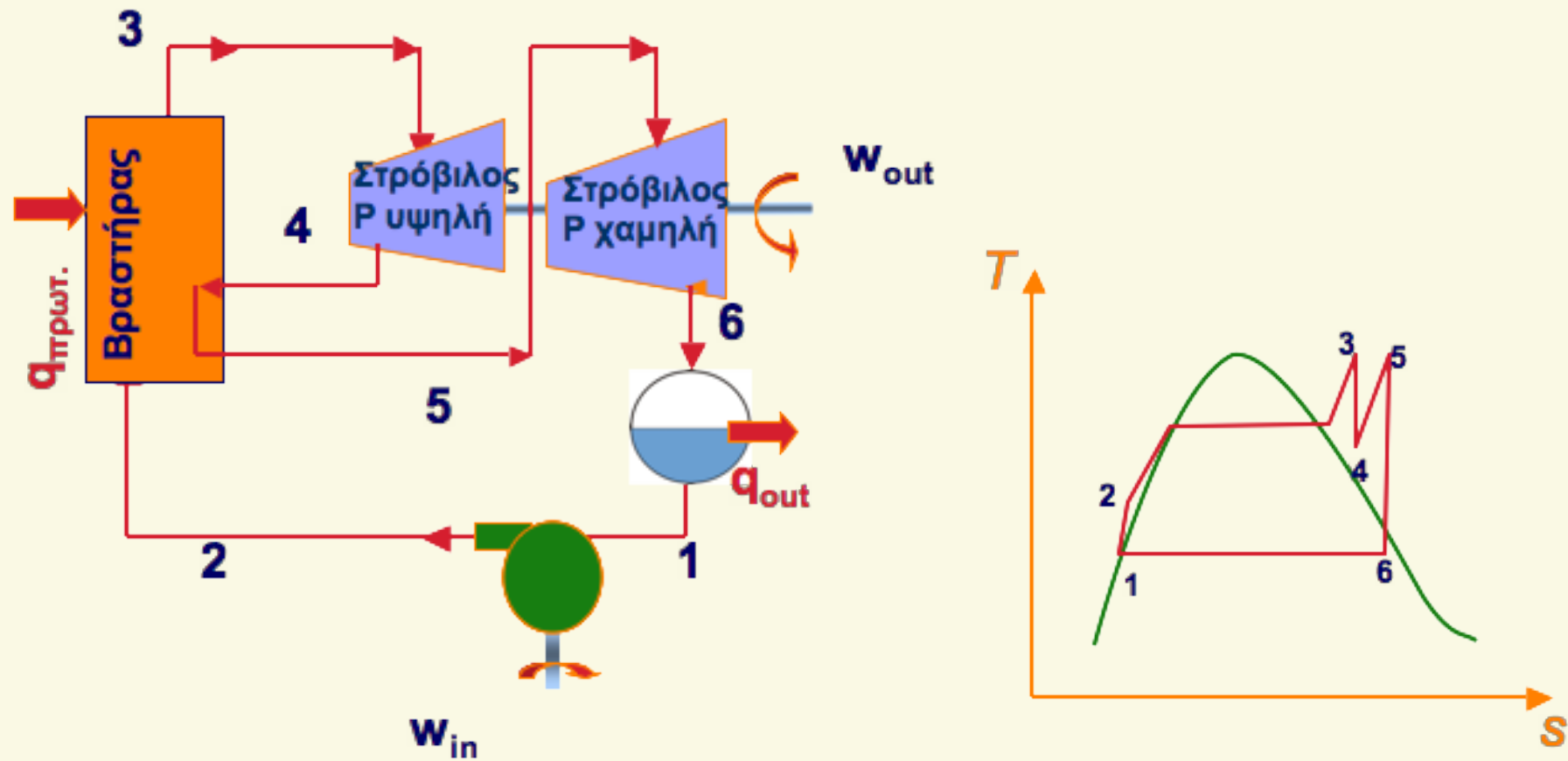


Αύξηση της T του υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του βραστήρα

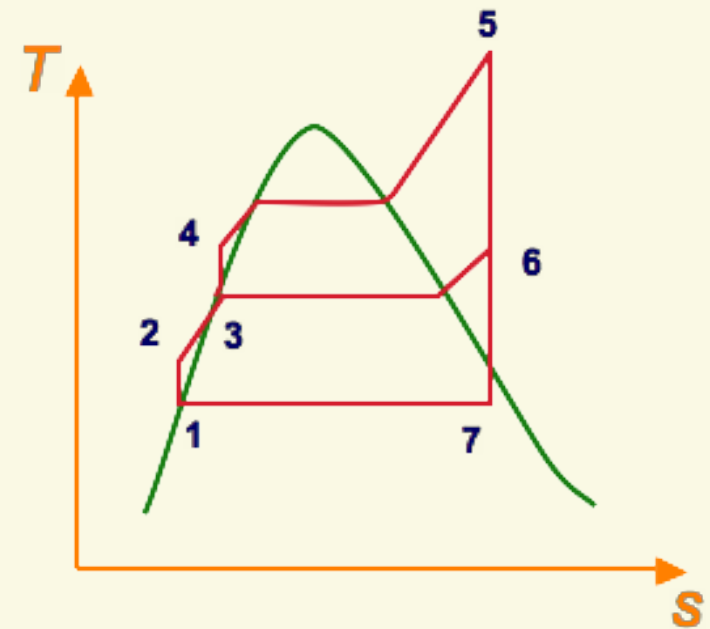
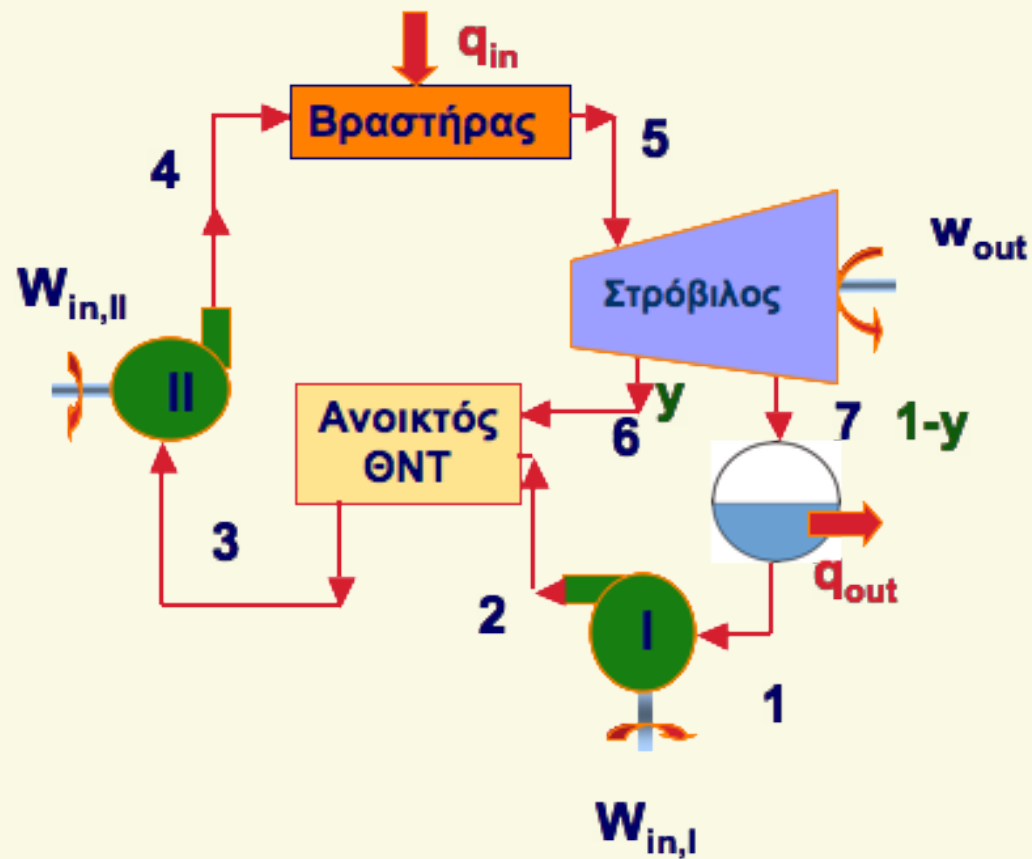


Αύξηση της P του βραστήρα

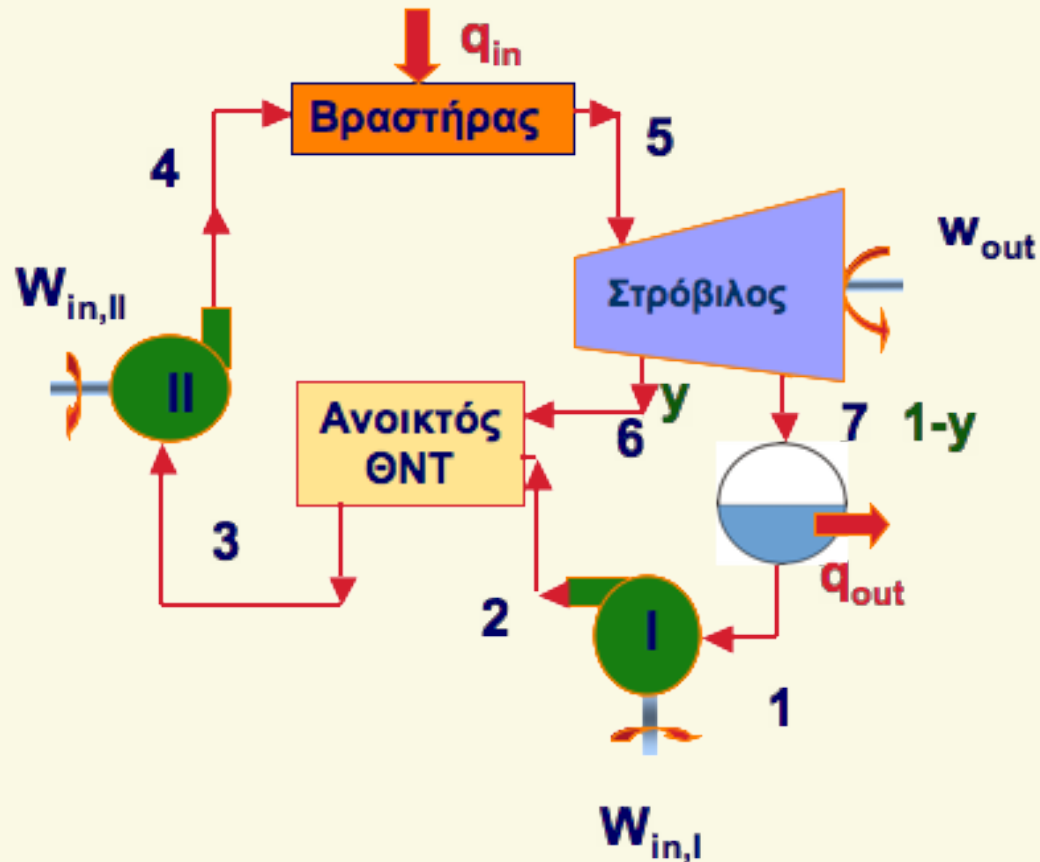
Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση



Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση



Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση



$$q_{in} = h_5 - h_4$$

$$q_{out} = (y - 1)(h_7 - h_1)$$

$$w_{out} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7)$$

$$w_{in} = (1 - y)w_{in,I} + w_{in,II}$$

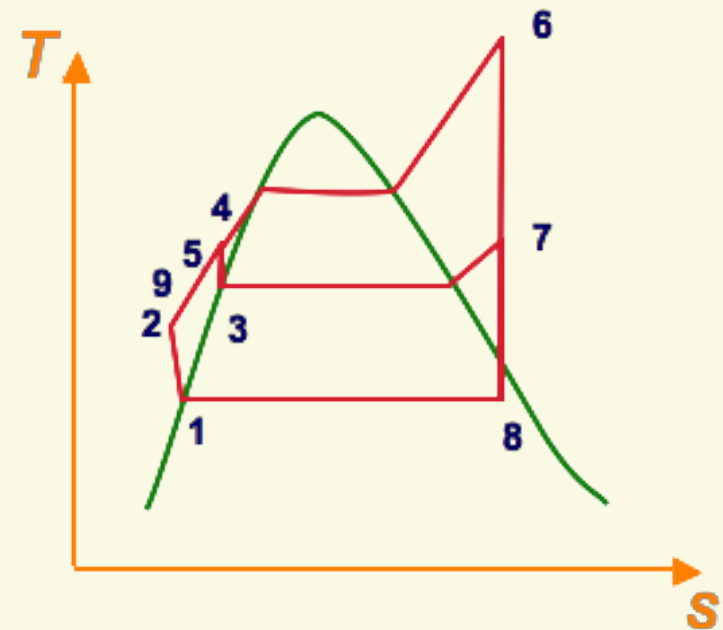
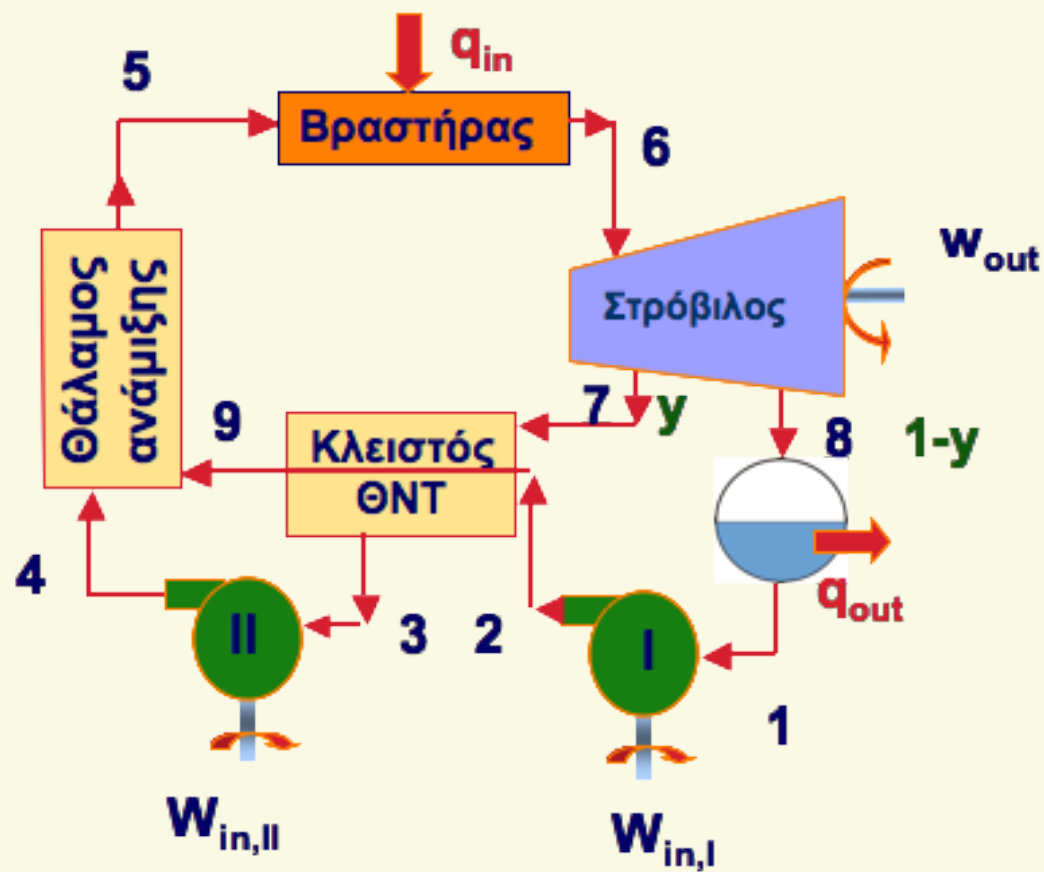
με

$$y = m_6/m_5$$

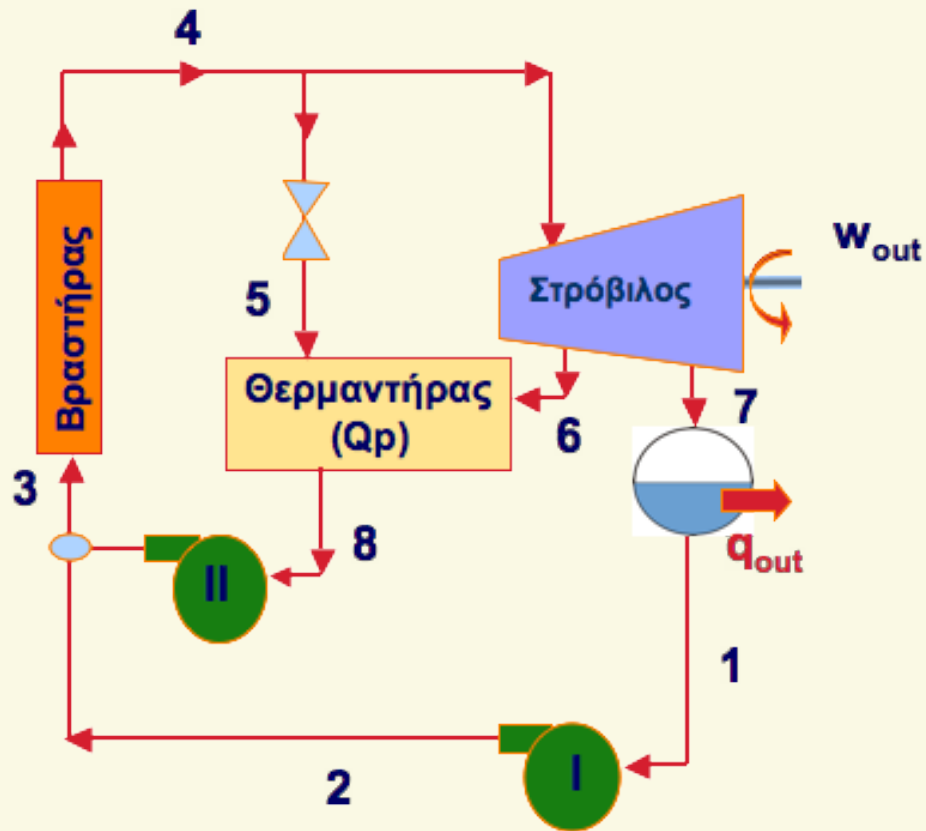
$$w_{in,I} = v_1(P_2 - p_1)$$

$$w_{in,II} = v_3(P_4 - P_3)$$

Κύκλος Rankine με αναγέννηση



Συμπαράγωγή (ηλεκτρισμού και θερμότητας)



Συντελεστής εκμετάλλευσης

$$\beta = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$