

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Εισαγωγή

Μία σημαντική εφαρμογή της θερμοδυναμικής είναι η παραγωγή ισχύος, η οποία επιτυγχάνεται από συστήματα που λειτουργούν με βάση κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο.

Οι διατάξεις ή τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για να παράγουν μια καθαρή ποσότητα ισχύος, συνήθως ονομάζονται **μηχανές** και οι θερμοδυναμικοί κύκλοι σύμφωνα με τους οποίους αυτές λειτουργούν ονομάζονται **κύκλοι παραγωγής ισχύος**.

Κατηγοριοποίηση θερμοδυναμικών κύκλων

A. Κύκλοι αερίου και ατμού

(ανάλογα με τη φάση του εργαζόμενου μέσου)

- **Κύκλοι αερίων:** το εργαζόμενο μέσο διατηρείται στην αέρια φάση σε όλη τη διάρκεια του κύκλου.
- **Κύκλοι ατμού:** το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται στη φάση ατμού κατά τη διάρκεια ενός τμήματος του κύκλου και στην υγρή φάση κατά τη διάρκεια κάποιου άλλου τμήματος του κύκλου.

B. Κλειστοί και ανοικτοί κύκλοι

- **Κλειστοί κύκλοι:** το εργαζόμενο μέσο επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση και επανακυκλοφορεί.
- **Ανοικτοί κύκλοι:** το εργαζόμενο μέσο αντί να επανακυκλοφορήσει, ανανεώνεται στο τέλος κάθε κύκλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Εισαγωγή

Κατηγοριοποίηση θερμοδυναμικών μηχανών

(ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο παρέχεται θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο)

A. Μηχανές εξωτερικής καύσης

(π.χ. ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ισχύος)

Η ενέργεια παρέχεται στο εργαζόμενο μέσο από μία εξωτερική πηγή (π.χ. κλίβανος, πυρηνικός αντιδραστήρας, ή ακόμα και ο ήλιος).

B. Μηχανές εσωτερικής καύσης

(π.χ. μηχανές αυτοκινήτων)

Η ενέργεια παρέχεται στο εργαζόμενο μέσο από την καύση του καυσίμου εντός των ορίων του συστήματος

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Για να γίνει εφικτή η αναλυτική μελέτη ενός κύκλου, πρέπει να διατηρούμε τις πολυπλοκότητες σε ένα διαχειρίσιμο επίπεδο και να χρησιμοποιούμε κάποιες εξιδανικεύσεις.



Όταν ένας πραγματικός κύκλος απαλλαγεί από όλες τις εσωτερικές μη αντιστρεπτότητες και πολυπλοκότητες, προκύπτει ένας κύκλος που μοιάζει με τον πραγματικό κύκλο, αλλά αποτελείται εξ ολοκλήρου από εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες. Ένας τέτοιος κύκλος ονομάζεται ιδανικός κύκλος.



Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Οι θερμικές μηχανές σχεδιάζονται με στόχο τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε έργο.

Η θερμική απόδοση ορίζεται ως ο λόγος του καθαρού έργου που παράγεται από τη μηχανή προς τη συνολική θερμότητα εισόδου:

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{ή} \quad n_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}}$$

Οι ιδανικοί κύκλοι είναι εσωτερικά αντιστρεπτοί αλλά σε αντίθεση με το κύκλο Carnot δεν είναι υποχρεωτικά και εξωτερικά αντιστρεπτοί, λόγω πιθανής ύπαρξης εξωτερικών μη αντιστρεπτοτήτων ως προς το σύστημα (π.χ. μεταφορά θερμότητας).



Για λειτουργία μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων:

$$n_{th, actual} < n_{th, id} < n_{th, rev}$$

λόγω των εξιδανικεύσεων που χρησιμοποιούνται

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Βασικές παραδοχές:

- Ο κύκλος δεν εμπεριέχει τριβές.
- Όλες οι διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης διεξάγονται σε συνθήκες ψευδοϊσορροπίας.
- Οι σωληνώσεις που συνδέουν τα διάφορα εξαρτήματα ενός συστήματος είναι επαρκώς μονωμένες και η μεταφορά θερμότητας διαμέσου αυτών θεωρείται αμελητέα.
- Αμελητέες μεταβολές στη δυναμική και κινητική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου.

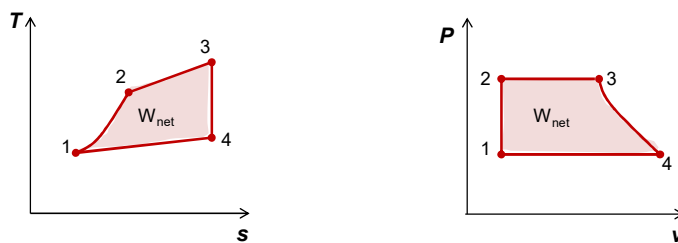
Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Διαγράμματα Ιδιοτήτων

Στο διάγραμμα $P-v$ και $T-s$, η περιοχή που περικλείεται από τις καμπύλες των διεργασιών ενός κύκλου, αναπαριστά το συνολικό έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Το συνολικό έργο είναι ισοδύναμο με τη συνολική μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια του κύκλου.



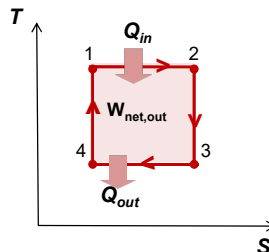
Διαγράμματα $P-v$ και $T-s$ κυκλικών διεργασιών.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Διαγράμματα T-s

- Κάθε διεργασία πρόσληψης θερμότητας λαμβάνει χώρα προς τη κατεύθυνση αύξησης της εντροπίας.
- Κάθε διεργασία απόρριψης θερμότητας λαμβάνει χώρα προς τη κατεύθυνση μείωσης της εντροπίας.
- Κάθε ισεντροπική (εσωτερικά αντιστρεπτή και αδιαβατική) διεργασία λαμβάνει χώρα με σταθερή εντροπία.



Διαγράμμα T-S του κύκλου Carnot.

- ✓ Εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη της διεργασίας προσθήκης θερμότητας: Q_{in}
- ✓ Εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη της διεργασίας απόρριψης θερμότητας: Q_{out}
- ✓ Η διαφορά των δύο εμβαδών: $Q_{in} - Q_{out} = W_{net,out}$

↓
Η συνολική μεταφορά
θερμότητας

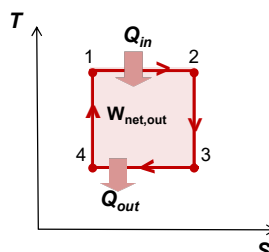
Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

Διαγράμματα T-s

Ο λόγος της επιφάνειας που περικλείεται από τις καμπύλες του κύκλου προς την επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη της διεργασίας προσθήκης θερμότητας, αναπαριστά τη θερμική απόδοση του κύκλου.

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$



Διαγράμμα T-S του κύκλου Carnot.

Οποιαδήποτε τροποποίηση αυξάνει το λόγο αυτών των δύο επιφανειών, θα αυξάνει επίσης και τη θερμική απόδοση του κύκλου.

Κύκλος Carnot

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.

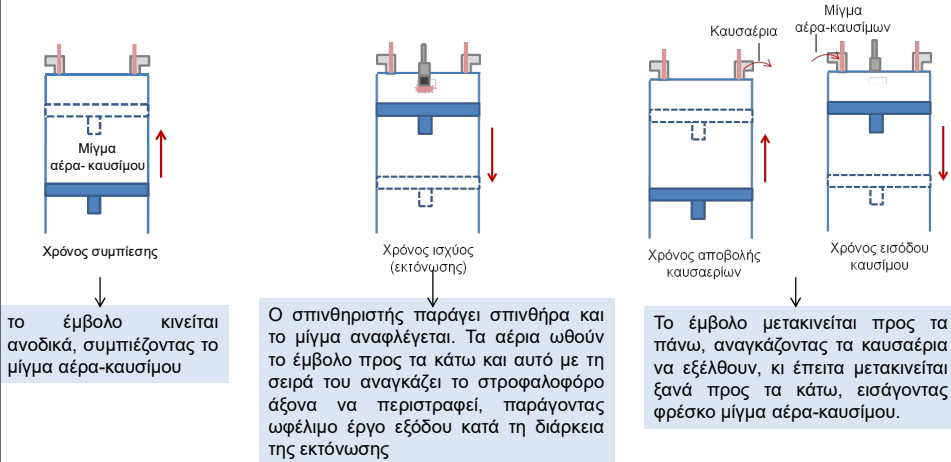
$$n_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

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

Πραγματικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης

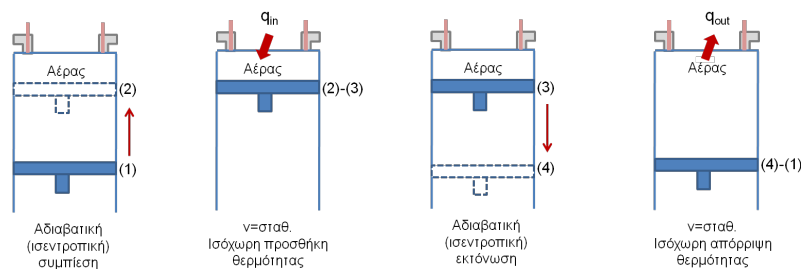


Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

Η ανάλυση των πραγματικών μηχανών ανάφλεξης μπορεί να απλουστευτεί, χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του προτύπου αέρα. Ο κύκλος που προκύπτει, και προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας είναι ο ιδανικός κύκλος Otto.

Ιδανικός κύκλος Otto

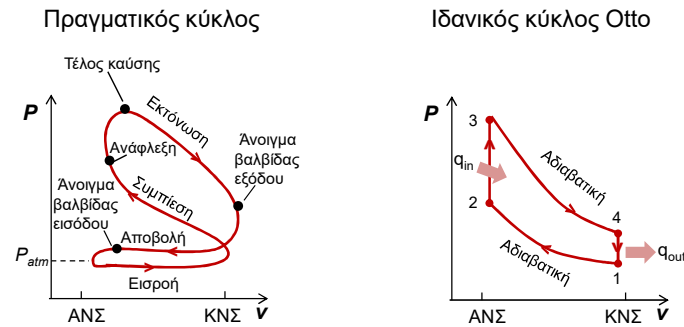


Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση
- (2)-(3): Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση
- (4)-(1): Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα



Το διάγραμμα P-v του πραγματικού και του ιδανικού κύκλου των μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα.

ΚΝΣ: Κατώτερο Νεκρό Σημείο

ΑΝΣ: Ανώτερο Νεκρό Σημείο

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

- ✓ Κλειστό σύστημα
- ✓ Αμελητέες μεταβολές στη κινητική και δυναμική ενέργεια

Ενεργειακό Ισοζύγιο για κάθε μία από τις διεργασίες:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta u \quad [kJ / kg]$$

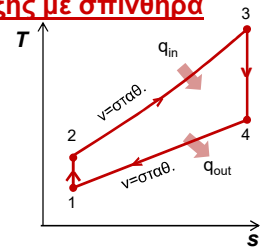
➤ Για τις ισόχωρες μεταφορές θερμότητας (2)-(3) και (4)-(1):

$$\left. \begin{aligned} q_{in} &= u_3 - u_2 = c_v \cdot (T_3 - T_2) \\ q_{out} &= u_4 - u_1 = c_v \cdot (T_4 - T_1) \end{aligned} \right\} \rightarrow n_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}}$$

$$n_{th,Otto} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \cdot (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 \cdot (T_3 / T_2 - 1)}$$

➤ Για τις ισηντροπικές διεργασίες (3)-(4) και (1)-(2):

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_4}{T_3} &= \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} & \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} & \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} &= \frac{T_3}{T_2} \end{aligned} \right\} \rightarrow n_{th,Otto} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1}$$



Διάγραμμα T-s του ιδανικού κύκλου Otto

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

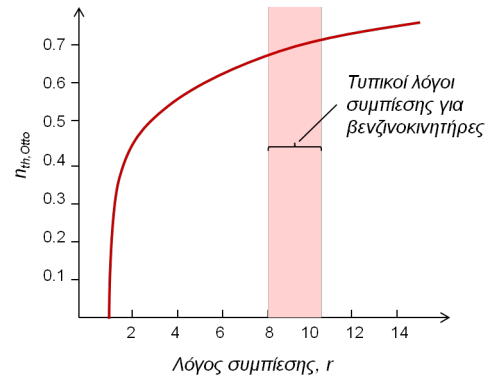
Όπου:

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{Ο λόγος συμπίεσης}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{Ο λόγος των ειδικών θερμότητων}$$

Η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Otto αυξάνεται με αύξηση του λόγου συμπίεσης της μηχανής ή/και του λόγου των ειδικών θερμότητων του εργαζόμενου μέσου.

Για μια δεδομένη τιμή του λόγου συμπίεσης, η θερμική απόδοση μιας πραγματικής μηχανής ανάφλεξης με σπινθήρα είναι μικρότερη από εκείνη ενός ιδανικού κύκλου Otto.



Θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto συναρτήσει του λόγου συμπίεσης για $k=1.4$.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

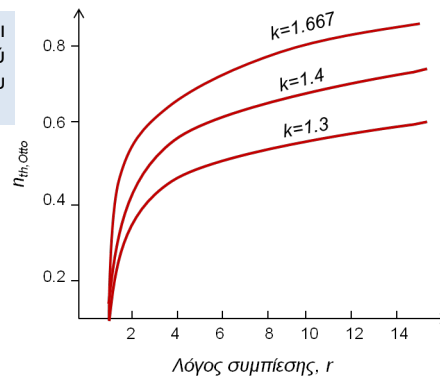
Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

Ο λόγος k των ειδικών θερμότητων και επομένως η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto μειώνεται καθώς τα μόρια του εργαζόμενου μέσου γίνονται μεγαλύτερα.

Ar, He: $k=1.667$

Αέρας: $k=1.4$

CO₂: $k=1.3$



Θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto συναρτήσει του λόγου συμπίεσης για $k=1.3$, 1.4 και 1.667 .

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

Ανακεφαλαίωση

Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση
- (2)-(3): Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση
- (4)-(1): Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Ενερgetικό Ισοζύγιο για τις διεργασίες (2)-(3) και (4)-(1):

$$\text{> (2)-(3): } q_{in} = u_3 - u_2 = c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

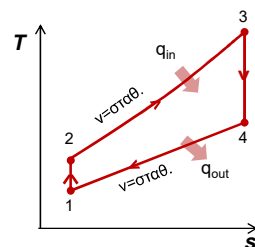
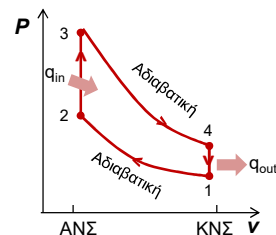
$$\text{> (4)-(1): } q_{out} = u_4 - u_1 = c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Θερμική απόδοση:

$$\eta_{th, Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$\text{Όπου: } r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{Ο λόγος συμπίεσης}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{Ο λόγος των ειδικών θερμότητων}$$



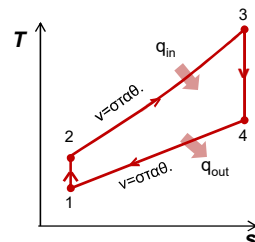
Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Otto

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Otto: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα

Παράδειγμα

10.1 Ένας ιδανικός κύκλος Otto που χρησιμοποιεί αργό (Ar) ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπίεσης ίσο με 8. Η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου είναι 300 K και 1340 K. Θεωρώντας ότι το Ar συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες, να προσδιορίσετε (α) την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται στο Ar κατά τη διάρκεια της διεργασίας πρόσληψης θερμότητας, (β) τη θερμική απόδοση του κύκλου Otto και (γ) τη θερμική απόδοση του κύκλου Carnot που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων.

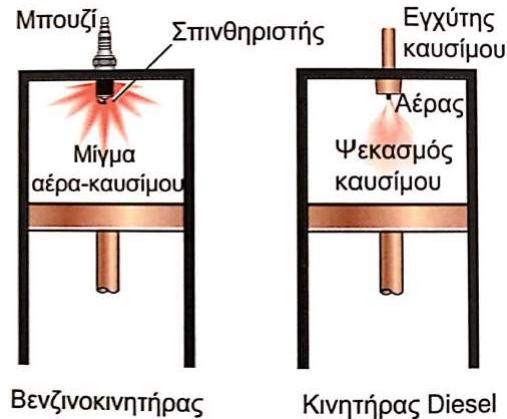


Διάγραμμα T-s του ιδανικού κύκλου Otto

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Diesel: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

Ο αέρας συμπιέζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει με επαφή καθώς το καύσιμο ψεκάζεται εντός του θερμού αυτού αέρα (πετρελαιοκινητήρες).



Στις μηχανές diesel, ο σπινθηριστής αντικαθίσταται από έναν εγχυτή καυσίμου και κατά τη διάρκεια της διεργασίας συμπίεσης συμπιέζεται μόνο ο αέρας

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Diesel: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

Ο αέρας συμπιέζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει με επαφή καθώς το καύσιμο ψεκάζεται εντός του θερμού αυτού αέρα (πετρελαιοκινητήρες).

Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση
- (2)-(3): Προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση
- (4)-(1): Απώρριψη θερμότητας υπό σταθερό όγκο

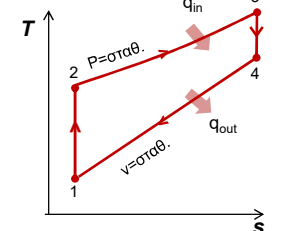
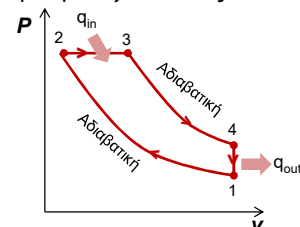
- Για την προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση (2)-(3):

$$q_{in} - w_{b,out} = u_3 - u_2 \Rightarrow q_{in} = P_2 \cdot (v_3 - v_2) + (u_3 - u_2)$$

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

- Για την απόρριψη θερμότητας υπό σταθερό όγκο (4)-(1):

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \Rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 \Rightarrow q_{out} = c_v \cdot (T_4 - T_1)$$



Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Diesel

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Diesel: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Diesel, υπό τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα:

$$n_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = \frac{(T_4 - T_1)}{k \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \cdot (T_4 / T_1 - 1)}{k \cdot T_2 \cdot (T_3 / T_2 - 1)}$$

➤ Για τις ισεντροπικές διεργασίες (1)-(2) και (3)-(4):

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1}, \quad \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad \longrightarrow \quad n_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \cdot \left[\frac{r_c^k - 1}{k \cdot (r_c - 1)} \right]$$

Όπου: $r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$ Ο λόγος αποκοπής (εκφράζει το λόγο των όγκων του κυλίνδρου πριν και μετά τη διεργασία καύσης)

$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$ Ο λόγος συμπίεσης $k = \frac{c_p}{c_v}$ Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Diesel: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

Ανακεφαλαίωση

Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση
- (2)-(3): Προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση
- (4)-(1): Απώριση θερμότητας υπό σταθερό όγκο

Ενεργειακό Ισοζύγιο για τις διεργασίες (2)-(3) και (4)-(1):

$$\begin{aligned} \text{➤ (2)-(3): } q_{in} - w_{b,out} &= u_3 - u_2 \Rightarrow q_{in} = P_2 \cdot (v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) \Rightarrow \\ q_{in} &= h_3 - h_2 \Rightarrow q_{in} = c_p \cdot (T_3 - T_2) \end{aligned}$$

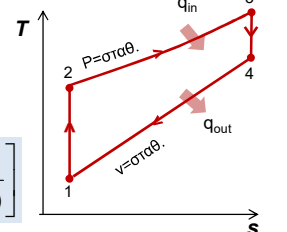
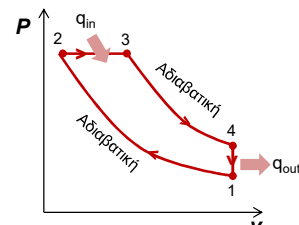
$$\text{➤ (4)-(1): } -q_{out} = u_1 - u_4 \Rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 \Rightarrow q_{out} = c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Θερμική απόδοση:

$$n_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \cdot \left[\frac{r_c^k - 1}{k \cdot (r_c - 1)} \right]$$

$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$ Ο λόγος αποκοπής $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$ Ο λόγος συμπίεσης

$k = \frac{c_p}{c_v}$ Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων



Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Diesel

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Diesel: Ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

Σύγκριση θερμικών αποδόσεων κύκλων Diesel και Otto:

$$n_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$n_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \cdot \left[\frac{r_c^k - 1}{k \cdot (r_c - 1)} \right]$$

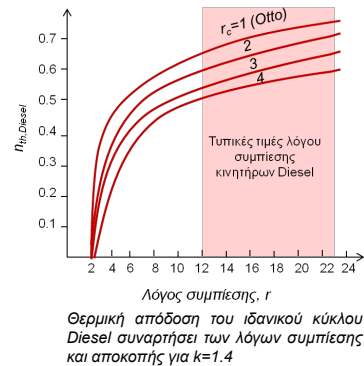
για τον ίδιο λόγο συμπίεσης

$n_{th,Otto} > n_{th,Diesel}$

> 1

➤ Μείωση του λόγου αποκοπής, $r_c \Rightarrow$ αύξηση της απόδοσης του κύκλου Diesel, $n_{th,Diesel}$

➤ Όταν, $r_c = 1 \Rightarrow n_{th,Otto} = n_{th,Diesel}$



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

Βενζινοκινητήρες: απόδοση 25-30 %

Πετρελαιοκινητήρες: απόδοση 35-40 %

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

Αν και οι κύκλοι Otto και Diesel είναι εσωτερικά αντιστρεπτοί (αποτελούνται από εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες), δεν είναι πλήρως αντιστρεπτοί.

Για να είναι πλήρως αντιστρεπτός ο κύκλος θα πρέπει οι διεργασίες προσθήκης και απόρριψης θερμότητας να πραγματοποιούνται ισόθερμα.

Δύο κύκλοι που εμπεριέχουν ισόθερμη πρόσληψη και απόρριψη θερμότητας είναι οι κύκλοι **Stirling** και **Ericsson**.

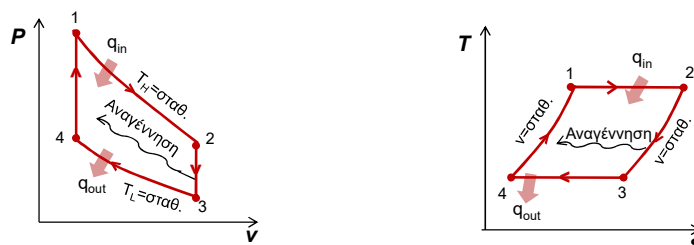
Οι κύκλοι **Stirling** και **Ericsson** χρησιμοποιούν αναγέννηση, μία διεργασία κατά την οποία μεταφέρεται θερμότητα σε μία συσκευή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (**αναγεννητής**) κατά τη διάρκεια ενός τμήματος του κύκλου. Η αποθηκευμένη θερμότητα επαναφέρεται στο εργαζόμενο μέσο κατά τη διάρκεια ενός άλλου τμήματος του κύκλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

Διεργασίες κύκλου Stirling:

- (1)-(2): Εκτόνωση υπό σταθερή θερμοκρασία T_H (προσθήκη θερμότητας από εξωτερική πηγή)
- (2)-(3): Αναγέννηση υπό σταθερό όγκο v (εσωτερική μεταφορά θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο στον αναγεννητή)
- (3)-(4): Συμπίεση υπό σταθερή θερμοκρασία T_L (απόρριψη θερμότητας σε εξωτερική δεξαμενή)
- (4)-(1): Αναγέννηση υπό σταθερό όγκο v (εσωτερική μεταφορά θερμότητας από τον αναγεννητή πίσω στο ρευστό λειτουργίας)



Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Stirling

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

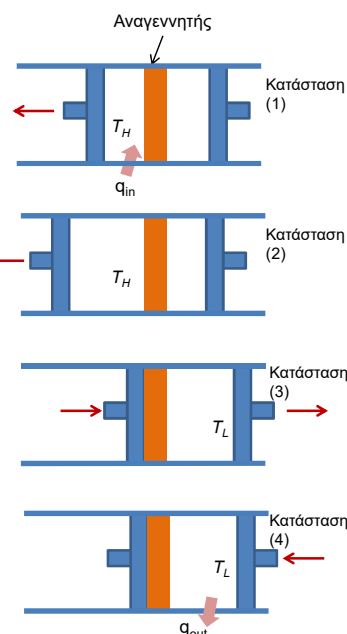
Η εκτέλεση του κύκλου Stirling:

Διεργασία (1)-(2): Θερμότητα μεταφέρεται στο αέριο σε θερμοκρασία T_H , από ένα θερμοδοχείο θερμοκρασίας T_H . Καθώς το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα, το αριστερό έμβολο κινείται προς τα έξω παράγοντας έργο, και η πίεση του αερίου μειώνεται.

Διεργασία (2)-(3): Τα δύο έμβολα κινούνται με την ίδια ταχύτητα προς τα δεξιά, μέχρι όλη η ποσότητα του αερίου περάσει στο δεξιό θάλαμο. Θερμότητα μεταφέρεται από το αέριο στον αναγεννητή και η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται από T_H σε T_L .

Διεργασία (3)-(4): Το δεξιό έμβολο κινείται προς τα αριστερά, συμπιέζοντας το αέριο. Καθώς η πίεση αυξάνεται, θερμότητα μεταφέρεται από το αέριο σε ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας T_L .

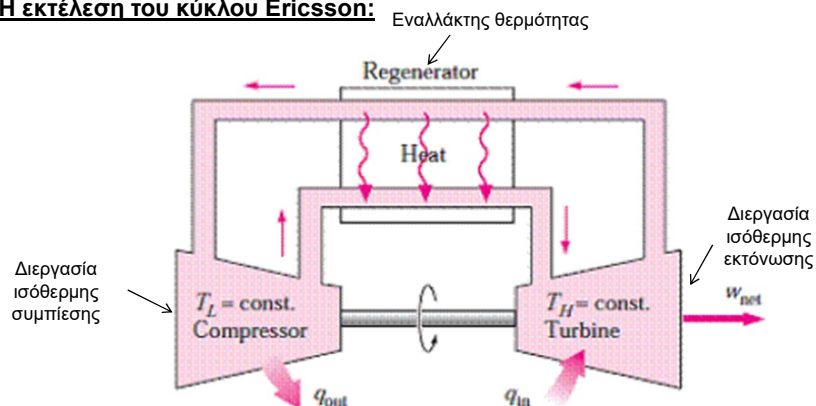
Διεργασία (4)-(1): Τα δύο έμβολα κινούνται με την ίδια ταχύτητα προς τα αριστερά, ωθώντας τη συνολική ποσότητα του αερίου στον αριστερό θάλαμο. Η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται από T_L σε T_H , επανακτώντας τη θερμική ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στον αναγεννητή.



Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

Η εκτέλεση του κύκλου Ericsson:

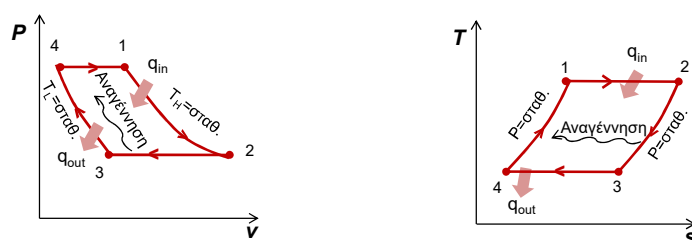


Ο κύκλος Ericsson μοιάζει αρκετά με το κύκλο Stirling, με τη διαφορά ότι οι δύο ισόχωρες διεργασίες ((2)-(3) και (4)-(1)) του κύκλου Stirling αντικαθίστανται από δύο ισοβαρείς.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Ericsson



Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Ericsson

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλοι Stirling και Ericsson

Θερμική απόδοση των κύκλων Stirling και Ericsson

Οι κύκλοι Stirling και Ericsson, όπως και ο κύκλος Carnot, είναι πλήρως αντιστρεπτοί => Σύμφωνα με την αρχή του Carnot πρέπει να έχουν την ίδια θερμική απόδοση όταν λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων.

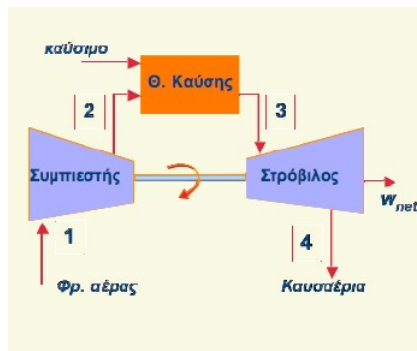
$$\eta_{th,Stirling} = \eta_{th,Ericsson} = \eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Οι μηχανές Stirling και Ericsson είναι μηχανές **εξωτερικής καύσης**: το καύσιμο καίγεται εκτός του κυλίνδρου, σε αντίθεση με τις μηχανές Otto και Diesel, όπου το καύσιμο καίγεται εντός του κυλίνδρου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Ο κύκλος Brayton βρίσκει εφαρμογή σε αεριοστρόβιλους, στους οποίους οι διεργασίες συμπίεσης κι εκτόνωσης πραγματοποιούνται σε περιστροφικές μηχανές (π.χ. προώθηση αεροσκαφών, παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος).



Μηχανή αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου.

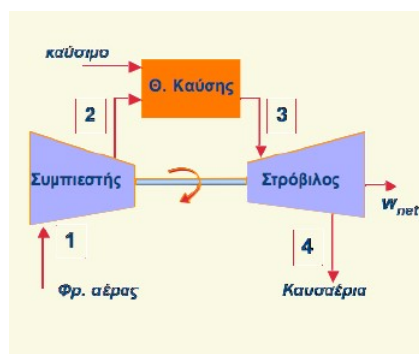
Λειτουργία αεριοστρόβιλων

- > Φρέσκος αέρας εισέρχεται στο συμπιεστή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες => αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα.
- > Ο αέρας υψηλής πίεσης οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου το καύσιμο καίγεται υπό σταθερή πίεση.
- > Τα υψηλής θερμοκρασίας αέρια που προκύπτουν, εισέρχονται στο στρόβιλο, όπου εκτονώνονται υπό ατμοσφαιρική πίεση, παράγοντας ισχύ.
- > Τα καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο απορρίπτονται (δηλ. δεν επανακυκλοφορούν) => ανοικτός κύκλος.

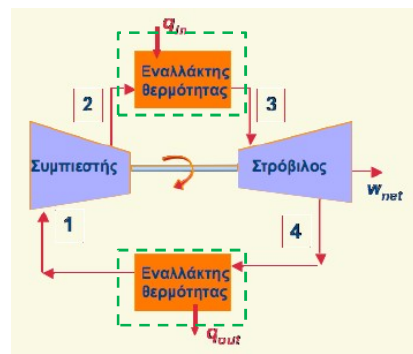
Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Ο ανοικτός κύκλος αεριοστροβίλου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας κλειστός κύκλος.



Μηχανή αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου.



Μηχανή αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.

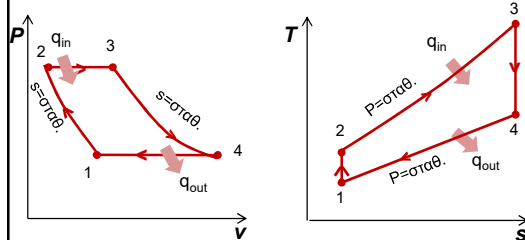
- Η διεργασία της καύσης αντικαθίσταται από μια ισοβαρή διεργασία πρόσληψης θερμότητας από μια εξωτερική πηγή.
- Η διεργασία απαγωγής των καυσαερίων αντικαθίσταται από μια ισοβαρή διεργασία απόρριψης θερμότητας στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

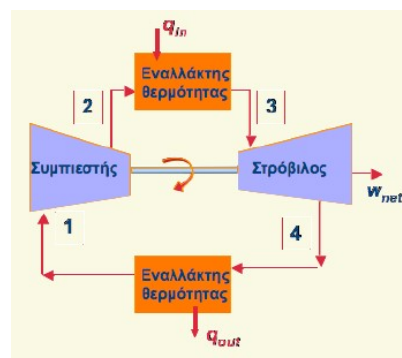
Κύκλος Brayton

Διεργασίες κύκλου Brayton:

- (1)-(2): Ισηντροπική συμπίεση (εντός συμπιεστή)
- (2)-(3): Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- (3)-(4): Ισηντροπική εκτόνωση (εντός στροβίλου)
- (4)-(1): Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας



Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Brayton



Μηχανή αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Οι διεργασίες του κύκλου Brayton είναι διεργασίες σταθεροποιημένης ροής.

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$(\Delta E_{\text{κιν}} \sim 0, \Delta E_{\text{δυν}} \sim 0)$$

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

Μεταφορά θερμότητας προς και από το εργαζόμενο μέσο:

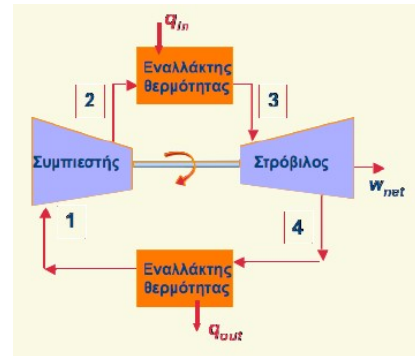
$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

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

Θερμική απόδοση:

$$\eta_{th, Brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

$$\Rightarrow \eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} \Rightarrow \eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{T_1 \cdot (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 \cdot (T_3 / T_2 - 1)}$$



Μηχανή αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Διεργασίες (1)-(2) και (3)-(4): ισηντροπικές

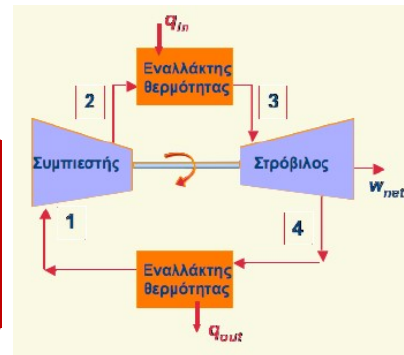
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(k-1)/k}$$

Διεργασίες (2)-(3) και (4)-(1): ισοβαρείς

$$\Rightarrow P_2 = P_3, P_4 = P_1 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{T_1 \cdot (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 \cdot (T_3 / T_2 - 1)}$$



Μηχανή αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

$$n_{th,Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

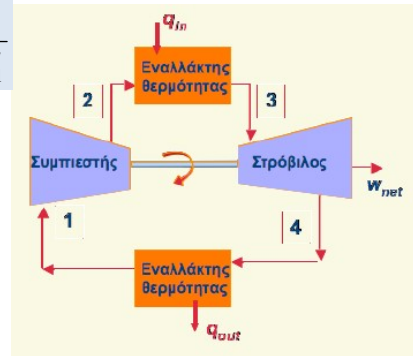
$$n_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{T_2/T_1}$$

$$n_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{(P_2/P_1)^{(k-1)/k}}$$

$$n_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Όπου: $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ ο λόγος των πιέσεων

k ο λόγος των ειδικών θερμότητων

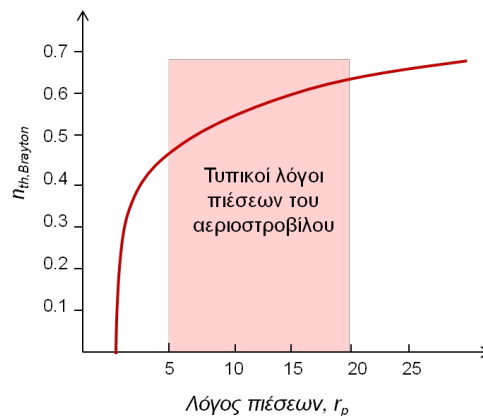


Μηχανή αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.

Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton αυξάνεται ανάλογα του λόγου των πιέσεων του αεριοστροβίλου και του λόγου των ειδικών θερμότητων του εργαζόμενου μέσου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton



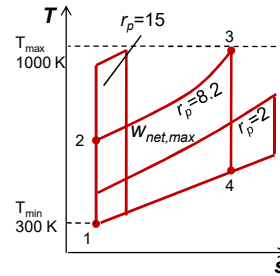
Η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Brayton συναρτίζεται του λόγου των πιέσεων για $k=1.4$.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

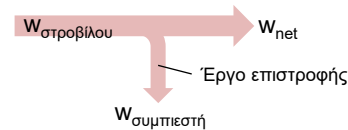
➤ Η υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου αναπτύσσεται στο τέλος της διεργασίας καύσης (κατάσταση 3) και περιορίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν τα περύγια του στροβίλου. Αυτή η θερμοκρασία περιορίζει επίσης και το λόγο των πιέσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κύκλο.

➤ Για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία του σημείου εισόδου του στροβίλου T_3 , το συνολικό έργο εξόδου ανά κύκλο αυξάνεται με το λόγο των πιέσεων, στη συνέχεια φθάνει μια μέγιστη τιμή, και κατόπιν αρχίζει να μειώνεται.



Για συγκεκριμένες τιμές των T_{min} και T_{max} , το συνολικό έργο του κύκλου Brayton αρχικά αυξάνεται με το λόγο των πιέσεων, στη συνέχεια φθάνει μια μέγιστη τιμή για $r_p = (T_{max}/T_{min})^{k/[2(k-1)]}$, και τελικά μειώνεται.

Το κλάσμα του έργου του στροβίλου που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του συμπιεστή, ονομάζεται λόγος επιστροφής έργου ($= W_{\text{συμπιεστή}} / W_{\text{στροβίλου}}$).



Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων αεριοστροβίλων από ιδανικούς κύκλους

Διαφορές μεταξύ πραγματικών κύκλων αεριοστροβίλων και ιδανικού κύκλου Brayton:

- Σε ένα πραγματικό κύκλο είναι αναπόφευκτη η πτώση πίεσης κατά τη διάρκεια των διεργασιών προσθήκης και απόρριψης θερμότητας.
- Το πραγματικό έργο εισόδου του συμπιεστή είναι μεγαλύτερο.
- Το πραγματικό έργο εξόδου του στροβίλου είναι μικρότερο λόγω μη αντιστρεπτοτήτων.

Υπολογισμός απόκλισης:

Συμπιεστής:
$$n_c = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

Στρόβιλος:
$$n_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

Όπου: 2a και 4a οι πραγματικές καταστάσεις εξόδου του συμπιεστή και του στροβίλου.

2s και 4s οι ισηντροπικές καταστάσεις εξόδου του συμπιεστή και του στροβίλου.

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Ανακεφαλαίωση

Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση (εντός συμπίεστή)
- (2)-(3): Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση (εντός στρόβιλου)
- (4)-(1): Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

Ενεργειακό Ισοζύγιο για τις διεργασίες (2)-(3) και (4)-(1):

$$\text{> (2)-(3): } q_{in} = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\text{> (4)-(1): } q_{out} = h_4 - h_1 = c_p \cdot (T_4 - T_1)$$

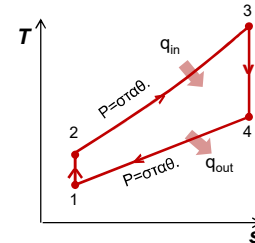
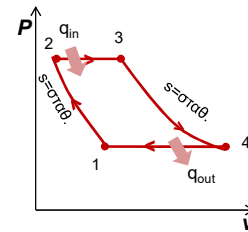
Θερμική απόδοση:

$$\eta_{th, Brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Όπου: $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ ο λόγος των πιέσεων

k ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων

Λόγος επιστροφής έργου ($= w_{\text{συμπίεστή}} / w_{\text{στρόβιλου}}$)



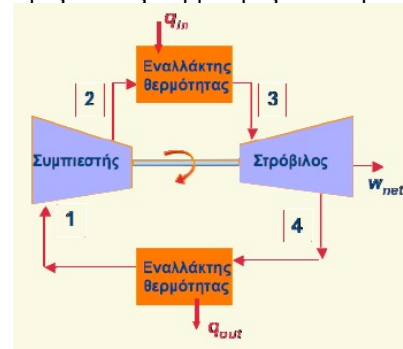
Διαγράμματα P-v και T-s του ιδανικού κύκλου Brayton

Κύκλοι Ισχύος των Αερίων

Κύκλος Brayton

Παράδειγμα

10.2 Μία μηχανή λειτουργεί με βάση τον ιδανικό κύκλο Brayton χρησιμοποιώντας αέρα ως εργαζόμενο μέσο. Ο αέρας εισέρχεται στον συμπίεστή σε πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 300 K και εξέρχεται από αυτόν σε πίεση 700 kPa και θερμοκρασία 580 K. Αν η θερμότητα που παρέχεται στη μηχανή κατά τη διάρκεια του κύκλου είναι 950 kJ/kg, να υπολογίσετε (α) το έργο που καταναλώνει ο συμπίεστής, (β) το έργο που παράγεται από το στρόβιλο και (γ) το λόγο επιστροφής έργου. Να θεωρήσετε ότι ο αέρας συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες και λόγο ειδικών θερμοτήτων $k=1.4$.

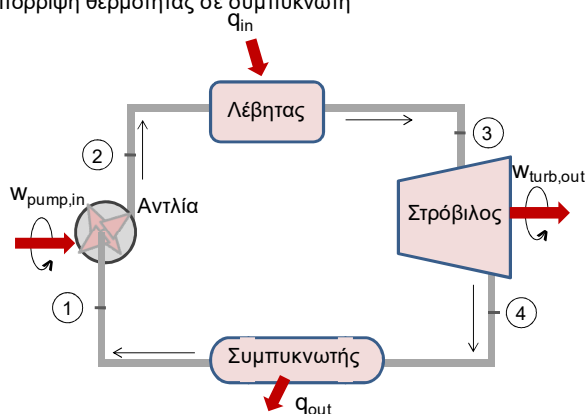


Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Διεργασίες κύκλου Rankine:

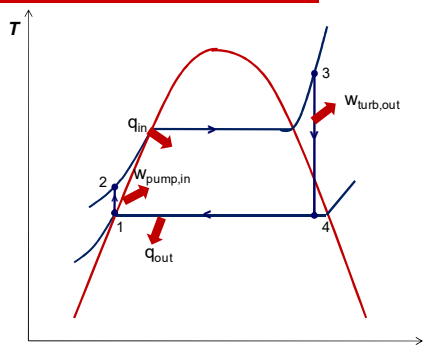
- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση σε αντλία
- (2)-(3): Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας σε λέβητα
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση σε στρόβιλο
- (4)-(1): Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας σε συμπυκνωτή



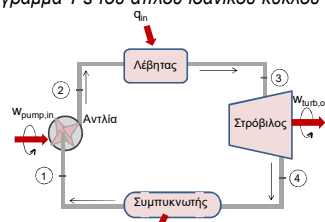
Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

- > Το νερό εισέρχεται στην αντλία στη κατάσταση 1 ως κορεσμένο υγρό και συμπιέζεται ισεντροπικά στη πίεση λειτουργίας του λέβητα.
- > Το νερό εισέρχεται στο λέβητα (εναλλάκτης θερμότητας) στη κατάσταση 2 ως συμπιεσμένο υγρό και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός στη κατάσταση 3.
- > Στη κατάσταση 3 ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο, όπου εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο, περιστρέφοντας τον άξονα που συνδέεται με μια ηλεκτρογεννήτρια.
- > Στη κατάσταση 4 ο ατμός εισέρχεται στο συμπυκνωτή (εναλλάκτης θερμότητας) ως κορεσμένο μίγμα υγρού-ατμού υψηλής ποιότητας, όπου και συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση, απορρίπτοντας θερμότητα προς ένα ψυκτικό μέσο (π.χ. λίμνη, πόταμος, ατμόσφαιρα).



Διάγραμμα T-s του απλού ιδανικού κύκλου Rankine



Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη της T διεργασίας (2)-(3):

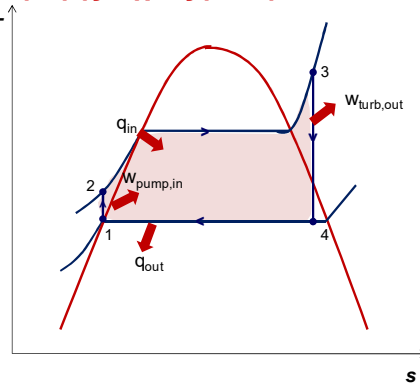
Η θερμότητα που μεταφέρεται στο νερό εντός του λέβητα.

Επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη της διεργασίας (4)-(1):

Η θερμότητα που απορρίπτεται στο συμπυκνωτή.

Η διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών (η περιοχή που περιβάλλεται από τη καμπύλη του κύκλου):

Το συνολικό έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου.



Διάγραμμα T-s του απλού ιδανικού κύκλου Rankine

Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Ενεργειακή ανάλυση του ιδανικού κύκλου Rankine:

Αντλία, λέβητας, στρόβιλος, συμπυκνωτής: διατάξεις σταθεροποιημένης ροής $\Rightarrow$ Οι 4 διεργασίες που συνιστούν το κύκλο Rankine θα αναλυθούν ως διεργασίες σταθεροποιημένης ροής.

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$(\Delta E_{\text{κιν}} \sim 0, \Delta E_{\text{δυν}} \sim 0)$$

$$(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) + (w_{\text{in}} - w_{\text{out}}) = h_{\text{exit}} - h_{\text{inlet}}$$

Αντλία ($q=0$):

$$w_{\text{pump,in}} = h_2 - h_1 \Rightarrow w_{\text{pump,in}} = v \cdot (P_2 - P_1)$$

Κατάσταση 1: Κορεσμένο υγρό:

$$h_1 = h_f @ P_1 \quad \text{και} \quad v \cong v_1 = v_f @ P_1$$

Λέβητας ($w=0$):

$$q_{\text{in}} = h_3 - h_2 \quad \text{Κατάσταση 2: συμπιεσμένο υγρό} \quad h_2 = h_f @ T_2$$

Κατάσταση 3: Υπέρθερμος ατμός

$$h_3 \quad \text{Υπέρθερμου ατμού σε } P_3, T_3$$

Στρόβιλος ($q=0$):

$$w_{\text{turb,out}} = h_3 - h_4 \quad \text{Κατάσταση 4: Κορεσμένο μίγμα:} \quad h_4 = h_f + x h_{fg}$$

Συμπυκνωτής ($w=0$):

$$q_{\text{out}} = h_4 - h_1$$

Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

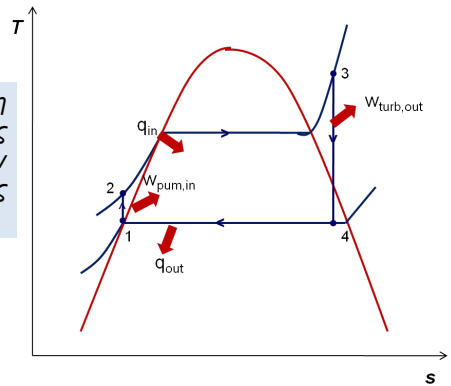
Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Rankine:

$$n_{th, Rankine} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

$$\text{Όπου: } w_{net} = q_{in} - q_{out} = w_{turb,out} - w_{pump,in}$$

Σε ένα διάγραμμα T - s , η θερμική απόδοση αναπαρίσται από το λόγο της επιφάνειας που περιβάλλεται από το κύκλο, ως προς την επιφάνεια κάτω από τη διεργασία προσθήκης θερμότητας (2)-(3).



Διάγραμμα T - s του απλού ιδανικού κύκλου Rankine

Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Ανακεφαλαίωση

Διεργασίες:

- (1)-(2): Ισεντροπική συμπίεση σε αντλία
- (2)-(3): Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας σε λέβητα
- (3)-(4): Ισεντροπική εκτόνωση σε στρόβιλο
- (4)-(1): Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας σε συμπυκνωτή

Ενεργειακό Ισοζύγιο για τις διεργασίες:

$$\text{➤ (1)-(2): } w_{pump,in} = h_2 - h_1 \Rightarrow w_{pump,in} = v \cdot (P_2 - P_1)$$

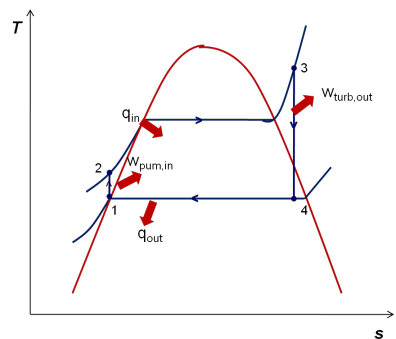
$$h_1 = h_f @ P_1 \quad v \cong v_1 = v_f @ P_1$$

$$\text{➤ (2)-(3): } q_{in} = h_3 - h_2$$

$$h_2 = h_f @ T_2 \quad h_3 \text{ Υπέρθερμου ατμού σε } P_3, T_3$$

$$\text{➤ (3)-(4): } w_{turb,out} = h_3 - h_4 \quad h_4 = h_f + x h_{fg}$$

$$\text{➤ (4)-(1): } q_{out} = h_4 - h_1$$



Διάγραμμα T - s του απλού ιδανικού κύκλου Rankine

Θερμική απόδοση:

$$n_{th, Rankine} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Όπου:

$$w_{net} = q_{in} - q_{out} = w_{turb,out} - w_{pump,in}$$

Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Κύκλος Rankine: Ο ιδανικός κύκλος παραγωγής ισχύος με ατμό

Παράδειγμα:

10.3 Θεωρούμε μία εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με υδρατμό η οποία λειτουργεί σύμφωνα με τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine. Ο υδρατμός εισέρχεται στο στρόβιλο σε πίεση 3 MPa και θερμοκρασία 350 °C και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε πίεση 75 kPa. Να προσδιορίσετε τη θερμική απόδοση του κύκλου.

