

Αντικειμενικοί στόχοι ενότητας

3/28

- Αποτίμηση της απόδοσης των κύκλων ισχύος αερίων, στους οποίους το εργαζόμενο μέσο παραμένει στην αέρια φάση καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου.
- Ανάπτυξη απλουστευμένων παραδοχών που εφαρμόζονται στους κύκλους ισχύος αερίων.
- Ανασκόπηση της λειτουργίας των παλινδρομικών μηχανών.
- Ανάλυση των ανοικτών και των κλειστών κύκλων ισχύος των αερίων.
- Επίλυση προβλημάτων με βάση τους κύκλους Otto, Diesel.
- Ο κύκλος SEILIGER ή semi-DIESEL.

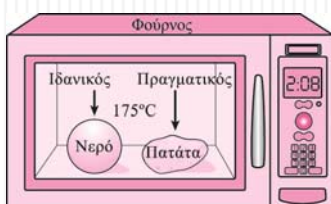
Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

4/28

Οι περισσότερες διατάξεις παραγωγής ισχύος λειτουργούν κυκλικά .

Ιδανικός κύκλος: ένας κύκλος που μοιάζει με τον πραγματικό κύκλο, αλλά αποτελείται εξ ολοκλήρου από αντιστρεπτές διεργασίες.

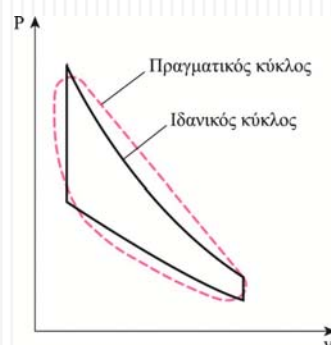
Οι αντιστρεπτοί κύκλοι όπως ο **κύκλος Carnot** έχουν την υψηλότερη θερμική απόδοση συγκριτικά με όλες τις θερμικές μηχανές που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών επιπέδων. Σε αντίθεση με τους ιδανικούς κύκλους, είναι πλήρως αντιστρεπτοί και ακατάλληλοι ως ρεαλιστικά πρότυπα.



Η μοντελοποίηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο της μηχανικής που παρέχει σημαντική κατανόηση και απλότητα με τίμημα την απώλεια κάποιας ακρίβειας στους υπολογισμούς

Θερμική απόδοση θερμικών μηχανών:

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



Η ανάλυση πολλών πολύπλοκων διεργασιών μπορεί να αναχθεί σε ένα διαχειρίσιμο επίπεδο χρησιμοποιώντας κάποιες εξιδανικεύσεις.

Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

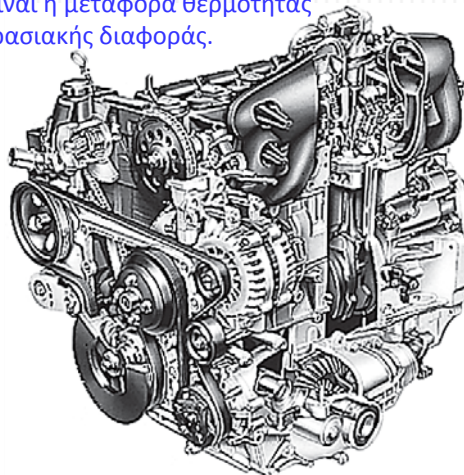
5/28

Οι ιδανικοί κύκλοι είναι εσωτερικά αντιστρεπτοί αλλά σε αντίθεση με τον κύκλο του Carnot, δεν είναι υποχρεωτικά και εξωτερικά αντιστρεπτοί.

Δηλαδή, είναι δυνατό να εμπεριέχουν αναντιστρεπτότητες εξωτερικές ως προς το σύστημα, όπως είναι η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς.

Επομένως, η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου είναι γενικά μικρότερη από εκείνη ενός πλήρως αντιστρεπτού κύκλου, που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων.

Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικά υψηλότερη από τη θερμική απόδοση του πραγματικού κύκλου, εξαιτίας των εξιδανικεύσεων που χρησιμοποιούνται.



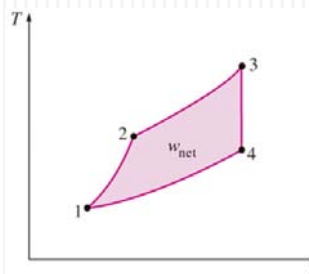
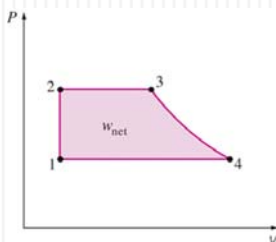
Βασικές Θεωρήσεις κατά την Ανάλυση Κύκλων Ισχύος

6/28

Οι εξιδανικεύσεις και οι απλοποιήσεις που εφαρμόζονται συνήθως κατά την ανάλυση των κύκλων ισχύος συνοψίζονται ως εξής:

1. Ο κύκλος δεν εμπεριέχει τριβές. Επομένως, το εργαζόμενο μέσο δεν υφίσταται κάποια πτώση πίεσης καθώς ρέει μέσα σε σωλήνες ή διατάξεις όπως οι εναλλάκτες θερμότητας.
2. Όλες οι διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης διεξάγονται σε συνθήκες ψευδοϊσορροπίας.
3. Οι σωληνώσεις που συνδέουν τα διάφορα εξαρτήματα ενός συστήματος είναι επαρκώς μονωμένες και η μεταφορά θερμότητας διαμέσου αυτών θεωρείται αμελητέα.

Σε ένα διάγραμμα $T-s$, ο λόγος της επιφάνειας που περικλείεται από τις καμπύλες του κύκλου προς την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη της διεργασίας προσθήκης θερμότητας, αναπαριστά τη θερμική απόδοση του κύκλου. Οποιαδήποτε τροποποίηση αυξάνει το λόγο αυτών των δύο επιφανειών, θα αυξάνει επίσης τη θερμική απόδοση του κύκλου.



Στα διαγράμματα $P-v$ και $T-s$, η περιοχή που περικλείεται από τις καμπύλες των διεργασιών αναπαριστάει το συνολικό έργο του κύκλου.

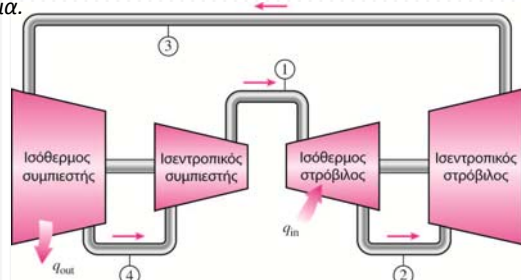
Ο Κύκλος Carnot και η Αξία του στη Μηχανική

7/28

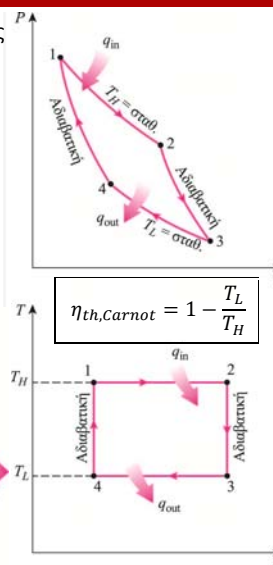
Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις πλήρως αντιστρεπτές διεργασίες: **1 – 2** ισόθερμη προσθήκη θερμότητας, **2 – 3** ισεντροπική εκτόνωση, **3 – 4** ισόθερμη απόρριψη θερμότητας και **4 – 1** ισεντροπική συμπίεση.

Για πραγματικούς και ιδανικούς κύκλους:

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



Μηχανή Carnot σταθεροποιημένης ροής.



Διαγράμματα P – v και T – s του κύκλου Carnot

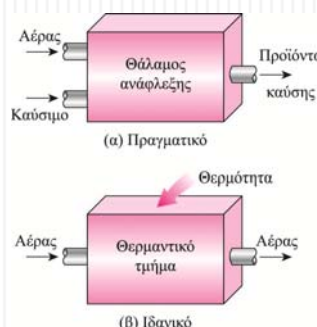
$$\eta_{th, Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Παραδοχές Πρότυπου Αέρα (Αέρας σε Πρότυπη Κατάσταση)

8/28

Οι πραγματικοί κύκλοι ισχύος αερίου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι. Για να περιοριστεί η ανάλυση σε ένα διαχειρίσιμο επίπεδο χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες παραδοχές, που είναι ευρέως γνωστές ως **παραδοχές πρότυπου αέρα**:

1. Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας, ο οποίος κυκλοφορεί συνεχώς εντός κλειστού βρόχου και συμπεριφέρεται πάντοτε ως ιδανικό αέριο.
2. Όλες οι διεργασίες που συνθέτουν τον κύκλο είναι αντιστρεπτές.
3. Η διεργασία της καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία προσθήκης θερμότητας, παρεχόμενη από εξωτερική πηγή.
4. Η διεργασία απαγωγής αντικαθίσταται από μια διεργασία απόρριψης θερμότητας η οποία επαναφέρει το εργαζόμενο μέσο στην αρχική του κατάσταση.



Στους ιδανικούς κύκλους, η διεργασία καύσης, μοντελοποιείται ως διεργασία προσθήκης θερμότητας.

Παραδοχές πρότυπου κρύου αέρα: Ο αέρας έχει σταθερές ειδικές θερμότητες, οι τιμές των οποίων καθορίζονται σε θερμοκρασία δωματίου (25°C).

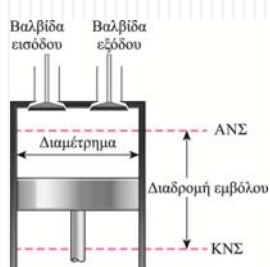
Κύκλος πρότυπου αέρα: Ένας κύκλος στον οποίο είναι εφαρμόσιμες οι παραδοχές του πρότυπου αέρα.

Επισκόπηση των Παλινδρομικών Μηχανών

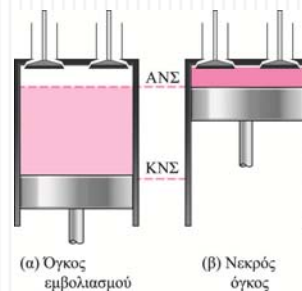
9/28

Οι παλινδρομικές μηχανές κατατάσσονται:

1. σε μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα (spark-ignition (SI) engines) και
2. σε μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση (compression-ignition (CI) engines).



Χρησιμοποιούμενη ορολογία στις παλινδρομικές μηχανές



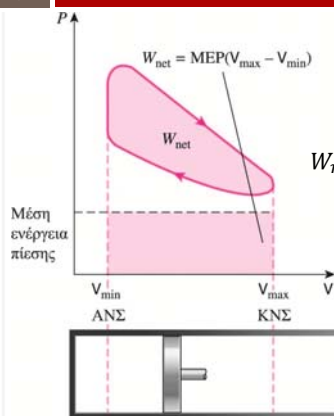
Ο όγκος εμβολισμού V_2 και
Ο νεκρός όγκος μιας παλινδρομικής μηχανής V_1

Ο λόγος του μέγιστου όγκου που δημιουργείται μέσα στον κύλινδρο ως προς τον ελάχιστο (νεκρό) όγκο, ονομάζεται **λόγος συμπίεσης** r της μηχανής:

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_{\text{ΚΝΣ}}}{V_{\text{ΑΝΣ}}} = \frac{V_1 + V_2}{V_1}$$

Επισκόπηση των Παλινδρομικών Μηχανών

10/28



Το συνολικό έργο εξόδου ενός κύκλου ισούται με το γινόμενο της μέσης ενεργούς πίεσης επί τον όγκο εμβολισμού

Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται συχνά με τις παλινδρομικές μηχανές είναι η **μέση ενεργός πίεση**, (MEP, mean effective pressure).

$$W_{\text{net}} = \text{MEP} \times (\text{Επιφάνεια εμβόλου}) \times (\text{Διαδρομή εμβόλου}) = \text{MEP} \times (\text{Όγκος εμβολισμού})$$

$$\text{MEP} = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{w_{\text{net}}}{v_{\max} - v_{\min}} \text{ (kPa)}$$

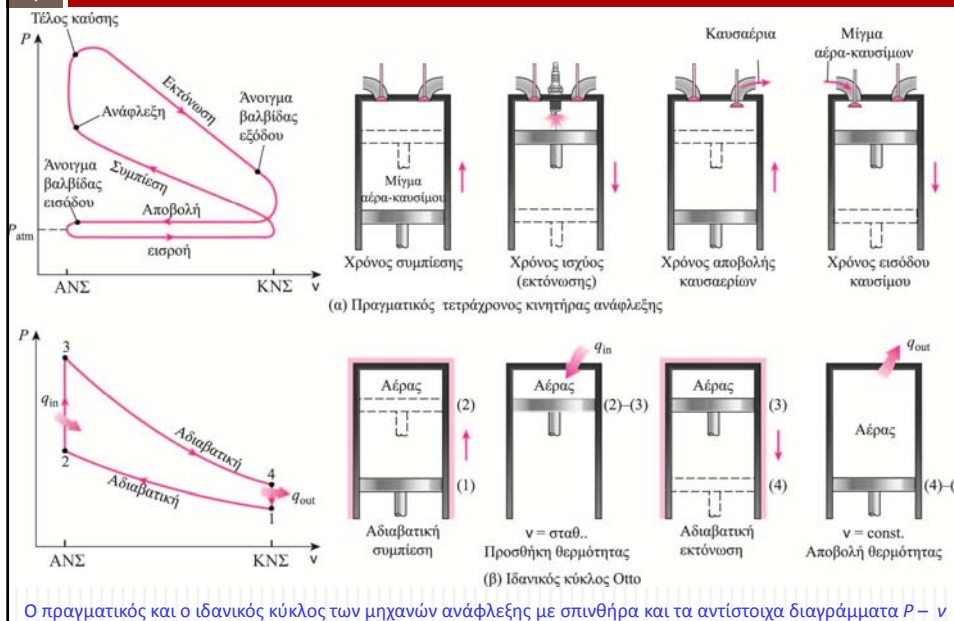
Μέση ενεργός πίεση

Η μέση ενεργός πίεση μπορεί να θεωρηθεί ως κριτήριο σύγκρισης της απόδοσης παλινδρομικών μηχανών του ίδιου μεγέθους.

Η μηχανή με την υψηλότερη μέση ενεργό πίεση αποδίδει περισσότερο έργο ανά κύκλο, άρα λειτουργεί πιο αποδοτικά.

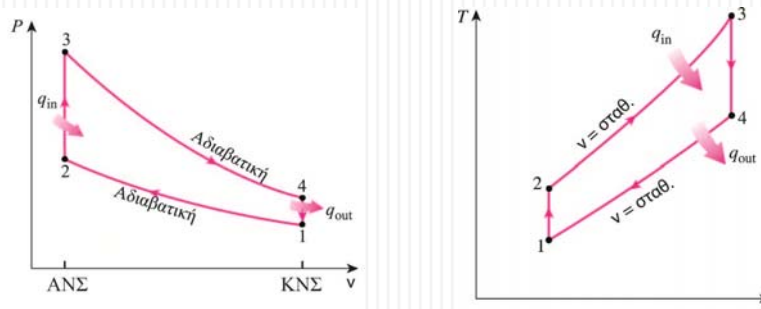
Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

11/28



12/28

Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα



Ο κύκλος που προκύπτει, και προσεγγίζει στενά τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, είναι ο ιδανικός κύκλος Otto. Αυτός αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες:

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

Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

13/28

Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto υπό τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα γίνεται:

$$\eta_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Οι διεργασίες 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές, και $v_2 = v_3$ και $v_4 = v_1$.

Άρα,

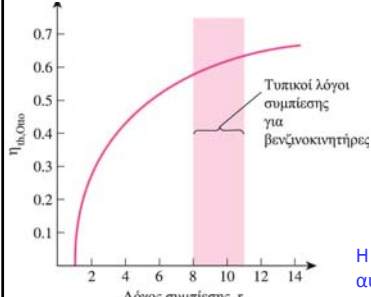
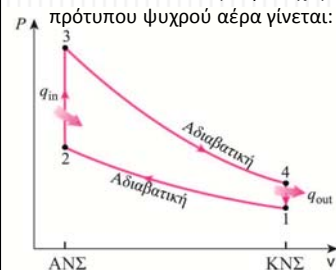
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις εξισώσεις στη σχέση της θερμικής απόδοσης και απλοποιώντας, προκύπτει:

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

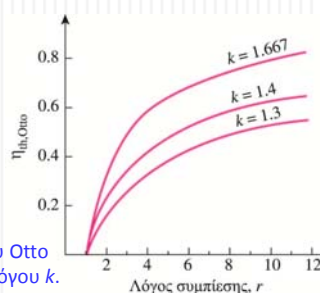
Όπου: r είναι ο λόγος συμπίεσης και k είναι ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων c_p/c_v

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Θερμική απόδοση ιδανικού κύκλου Otto ως συνάρτηση του λόγου συμπίεσης ($k=1,4$)

Η θερμική απόδοση του κύκλου Otto αυξάνεται με την αύξηση του λόγου k .



Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

14/28

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Otto

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 17°C, και κατά τη διάρκεια της ισόχωρης διεργασίας προσθήκης θερμότητας μεταφέρονται στον αέρα 800 kJ/kg θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμοτήτων του αέρα με τη θερμοκρασία, να προσδιορίσετε:

- τη μέγιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου,
- το συνολικό έργο εξόδου,
- τη θερμική απόδοση και
- τη μέση ενεργό πίεση του κύκλου.

Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

15/28 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Otto

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 17°C, και κατά τη διάρκεια της ισόχωρης διεργασίας προσθήκης θερμότητας μεταφέρονται στον αέρα 800 kJ/kg θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμοτήτων του αέρα με τη θερμοκρασία, να προσδιορίσετε: (α) τη μέγιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου, (β) το συνολικό έργο εξόδου, (γ) τη θερμική απόδοση και (δ) τη μέση ενεργό πίεση του κύκλου.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον Πίνακα A-17.

$$T_1 = 290\text{K} \rightarrow u_1 = 206,91\text{ kJ/kg}$$

$$v_{r1} = 676,1$$

Διεργασία 1-2 (ισεντροπική συμπίεση ενός ιδανικού αερίου):

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} \rightarrow v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{676,1}{8} = 84,51 \rightarrow T_2 = 652,4\text{K}$$

$$u_2 = 475,11\text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = (100\text{ kPa}) \left(\frac{652,4\text{K}}{290\text{K}} \right) (8) = 1.799,7\text{ kPa}$$

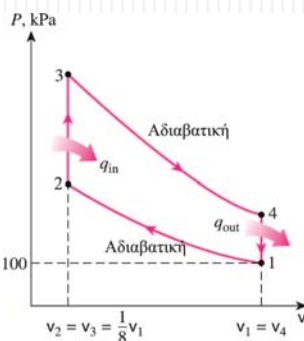
Διεργασία 2-3 (ισόχωρη προσθήκη θερμότητας):

$$q_{in} = u_3 - u_2$$

$$800\text{ kJ/kg} = u_3 - 475,11\text{ kJ/kg}$$

$$u_3 = 1275,11\text{ kJ/kg} \rightarrow \begin{cases} T_3 = 1575,1\text{K} \\ v_{r3} = 6,108 \end{cases}$$

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \rightarrow P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{v_2}{v_3} \right) = (1,799\text{ MPa}) \left(\frac{1575,1\text{K}}{652,4\text{K}} \right) (1) = 4,345\text{ MPa}$$



Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

16/28 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Otto

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 17°C, και κατά τη διάρκεια της ισόχωρης διεργασίας προσθήκης θερμότητας μεταφέρονται στον αέρα 800 kJ/kg θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμοτήτων του αέρα με τη θερμοκρασία, να προσδιορίσετε: (α) τη μέγιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου, (β) το συνολικό έργο εξόδου, (γ) τη θερμική απόδοση και (δ) τη μέση ενεργό πίεση του κύκλου.

(β) Το συνολικό έργο εξόδου του κύκλου προσδιορίζεται, είτε βρίσκοντας με ολοκλήρωση το έργο ογκομεταβολής (PdV) που εμπεριέχεται σε κάθε διεργασία και προσθέτοντας μεταξύ τους αυτές τις τιμές, είτε βρίσκοντας τη συνολική μεταφορά θερμότητας που είναι ισοδύναμη με το συνολικό παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια του κύκλου. Επιλέγουμε την δεύτερη προσέγγιση. Ωστόσο, αρχικά χρειάζεται να βρούμε την εσωτερική ενέργεια του αέρα στην κατάσταση 4.

Διεργασία 3-4 (ισεντροπική εκτόνωση ενός ιδανικού αερίου):

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = r \rightarrow v_{r4} = r v_{r3} = (8)(6,108) \rightarrow T_4 = 795,6\text{K}$$

$$u_4 = 588,74\text{ kJ/kg}$$

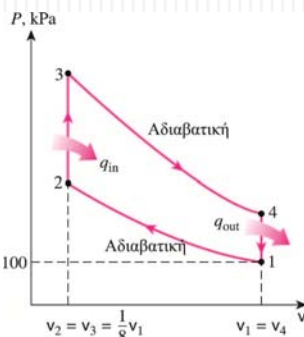
Διεργασία 4-1 (ισόχωρη απόρριψη θερμότητας):

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1$$

$$q_{out} = 588,74\text{ kJ/kg} - 206,9\text{ kJ/kg} = 381,83\text{ kJ/kg}$$

Άρα,

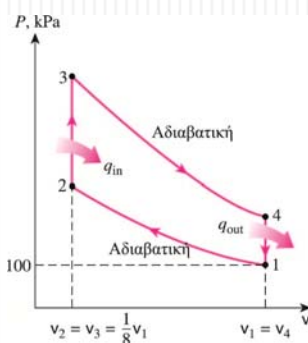
$$w_{net} = q_{net} = q_{in} - q_{out} = 800\text{ kJ/kg} - 381,83\text{ kJ/kg} = 418,17\text{ kJ/kg}$$



Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

17/28 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Otto

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 17°C, και κατά τη διάρκεια της ισόχωρης διεργασίας προσθήκης θερμότητας μεταφέρονται στον αέρα 800 kJ/kg θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμοτήτων του αέρα με τη θερμοκρασία, να προσδιορίσετε: (α) τη μέγιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου, (β) το συνολικό έργο εξόδου, (γ) τη θερμική απόδοση και (δ) τη μέση ενεργό πίεση του κύκλου.



(γ) Η θερμική απόδοση του κύκλου προσδιορίζεται από τον ορισμό της:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{418,17 \text{ kJ/kg}}{800 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0,523 \text{ ή } 52,3\%}$$

Υπό τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα (σταθερές τιμές των ειδικών θερμοτήτων σε θερμοκρασία δωματίου), η θερμική απόδοση θα ήταν:

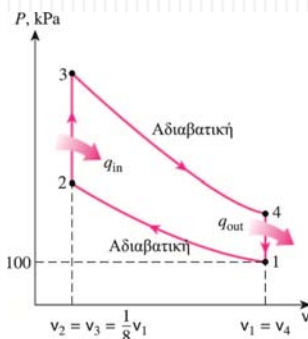
$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 1 - (8)^{1-1,4} = 0,565 \text{ ή } 56,5\%$$

τιμή που είναι σημαντικά διαφορετική από την προηγούμενη. Επομένως, η χρήση των παραδοχών του πρότυπου ψυχρού αέρα θα πρέπει να εξετάζεται με προσοχή.

Ο Κύκλος Otto: Ο Ιδανικός Κύκλος Μηχανών Ανάφλεξης με Σπινθήρα

18/28 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Otto

Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 17°C, και κατά τη διάρκεια της ισόχωρης διεργασίας προσθήκης θερμότητας μεταφέρονται στον αέρα 800 kJ/kg θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των ειδικών θερμοτήτων του αέρα με τη θερμοκρασία, να προσδιορίσετε: (α) τη μέγιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου, (β) το συνολικό έργο εξόδου, (γ) τη θερμική απόδοση και (δ) τη μέση ενεργό πίεση του κύκλου.



(δ) Η μέση ενεργός πίεση προσδιορίζεται από τον ορισμό της, Εξίσωση (9.4):

$$MEP = \frac{w_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_1/r} = \frac{w_{net}}{v_1(1 - 1/r)}$$

όπου

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(290\text{K})}{100\text{kPa}} = 0,832 \text{ m}^3/\text{kg}$$

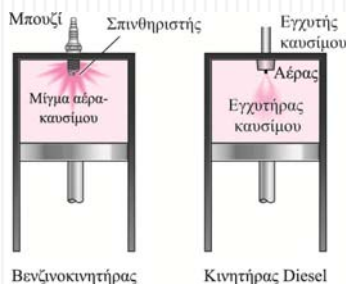
Επομένως,

$$MEP = \frac{418,17 \text{ kJ/kg}}{(0,832 \text{ m}^3/\text{kg})(1 - \frac{1}{8})} \left(\frac{1\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{1\text{kJ}} \right) = \mathbf{574\text{kPa}}$$

Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

19/28

Στις μηχανές diesel, συμπιέζεται μόνον αέρας κατά τη διάρκεια P της διαδρομής συμπίεσης, εκμηδενίζοντας την πιθανότητα αυτανάφλεξης. Για το λόγο αυτό, οι μηχανές diesel μπορούν να σχεδιασθούν για να λειτουργούν με πολύ υψηλότερους λόγους συμπίεσης, με τιμές συνήθως μεταξύ 12 και 24.

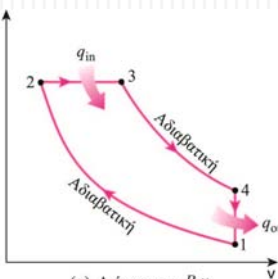
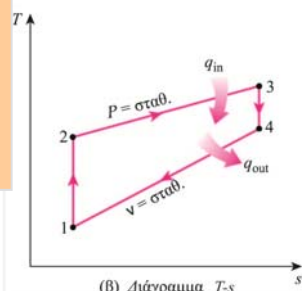


Βενζινοκινητήρας

Κινητήρας Diesel

Στις μηχανές diesel, ο σπινθηριστής αντικαθίσταται από έναν εγχυτήρα καυσίμου και κατά τη διάρκεια της διεργασίας συμπίεσης συμπιέζεται μόνον αέρας.

- 1-2 ισεντροπική συμπίεση
- 2-3 ισοβαρής προσθήκη θερμότητας
- 3-4 ισεντροπική εκτόνωση
- 4-1 ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

(α) Διάγραμμα $P-v$ (β) Διάγραμμα $T-s$

Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

20/28

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

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2((T_3/T_2) - 1)}$$

Ορίζεται μια νέα ποσότητα, ο **λόγος αποκοπής** r_c , ως ο λόγος των όγκων του κυλίνδρου πριν και μετά τη διεργασία καύσης:

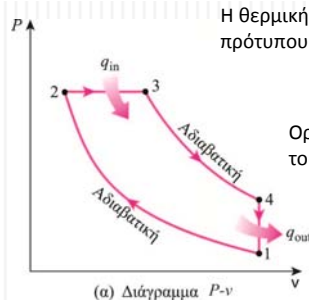
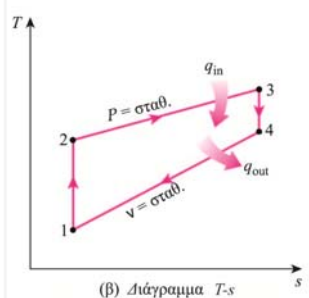
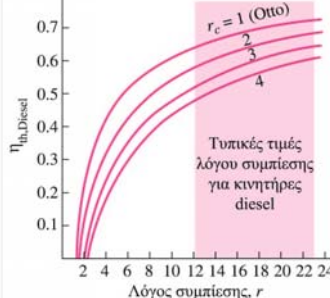
$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ορισμό και τις ισεντροπικές σχέσεις ιδανικού αερίου για τις διεργασίες 1-2 και 3-4, η σχέση της θερμικής απόδοσης ανάγεται στην

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

$\eta_{th,Otto} > \eta_{th,Diesel}$
για τον ίδιο λόγο συμπίεσης

Θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Diesel συναρτήσει των λόγων συμπίεσης και αποκοπής ($k = 1,4$).

(α) Διάγραμμα $P-v$ (β) Διάγραμμα $T-s$ 

Ο Κύκλος Otto ή Diesel: Δίχρονες & Τετράχρονες μηχανές

21/28

Τετράχρονη μηχανή:

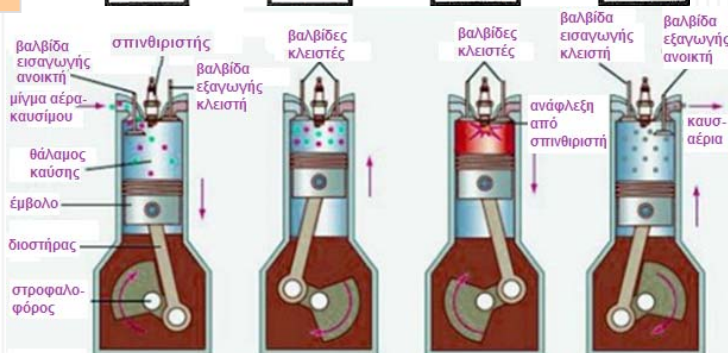
1 κύκλος =
4 διαδρομές =
2 περιστροφές

Δίχρονη μηχανή:

1 κύκλος =
2 διαδρομές =
1 περιστροφή



Οι δίχρονες μηχανές είναι γενικά λιγότερο αποδοτικές από τις τετράχρονες, αλλά είναι κατασκευαστικά απλούστερες και παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος.



Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

22/28

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-3: Ο Ιδανικός Κύκλος Diesel

Ένας ιδανικός κύκλος Diesel με αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπίεσης 18 και λόγο αποκοπής 2. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε 100 kPa, 27 °C και 1917 cm³. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα, να προσδιορίσετε:

- τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα στο τέλος της κάθε διεργασίας,
- το συνολικό έργο εξόδου και την θερμική απόδοση, και
- την μέση ενεργό πίεση.

Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

23/28 **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Diesel**

Ένας ιδανικός κύκλος Diesel με αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπύεσης 18 και λόγο αποκοπής 2. Στην αρχή της διεργασίας συμπύεσης, το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε 100 kPa, 27°C και 1917 cm³. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα στο τέλος της κάθε διεργασίας, (β) το συνολικό έργο εξόδου και την θερμική απόδοση, και (γ) την μέση ενεργό πίεση.

Ιδιότητες: Η σταθερά αερίου του αέρα είναι $R = 0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$ ενώ οι υπόλοιπες ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου είναι $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_v = 0,718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ και $k = 1,4$ (Πίνακας A-2α).

(α) Οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης στο τέλος της κάθε διεργασίας μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τις ισεντροπικές σχέσεις ιδανικού αερίου για τις διεργασίες 1-2 και 3-4. Αρχικά όμως προσδιορίζουμε τους όγκους στο τέλος της κάθε διεργασίας, από τους ορισμούς του λόγου συμπύεσης και του λόγου αποκοπής:

$$V_2 = \frac{V_1}{r} = \frac{1917 \text{ cm}^3}{18} = 106,5 \text{ cm}^3$$

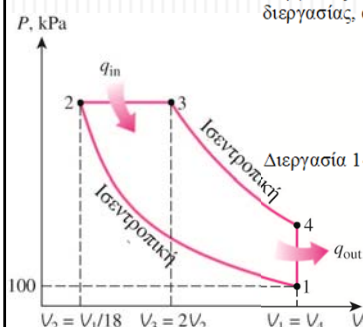
$$V_3 = r_c V_2 = (2)(106,5 \text{ cm}^3) = 213 \text{ cm}^3$$

$$V_4 = V_1 = 1917 \text{ cm}^3$$

Διεργασία 1-2 (ισεντροπική συμπύεση ιδανικού αερίου, σταθερές ειδικές θερμότητες):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = (300 \text{ K})(18)^{1,4-1} = 953 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = (100 \text{ kPa})(18)^{1,4} = 5.720 \text{ kPa}$$



Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

24/28 **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Diesel**

Ένας ιδανικός κύκλος Diesel με αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπύεσης 18 και λόγο αποκοπής 2. Στην αρχή της διεργασίας συμπύεσης, το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε 100 kPa, 27°C και 1917 cm³. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα στο τέλος της κάθε διεργασίας, (β) το συνολικό έργο εξόδου και την θερμική απόδοση, και (γ) την μέση ενεργό πίεση.

Διεργασία 2-3 (ισοβαρής προσθήκη θερμότητας σε ιδανικό αέριο):

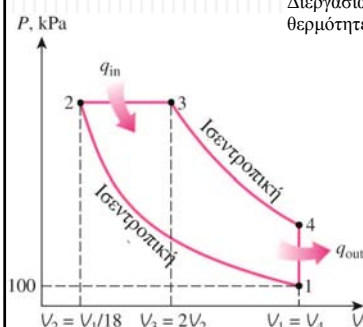
$$P_3 = P_2 = 5.720 \text{ kPa}$$

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \rightarrow T_3 = T_2 \left(\frac{V_3}{V_2} \right) = (953 \text{ K})(2) = 1.906 \text{ K}$$

Διεργασία 3-4 (ισεντροπική εκτόνωση ιδανικού αερίου, σταθερές ειδικές θερμότητες):

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = (1.906 \text{ K}) \left(\frac{213 \text{ cm}^3}{1917 \text{ cm}^3} \right)^{1,4} = 791 \text{ K}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k = (5720 \text{ kPa}) \left(\frac{213 \text{ cm}^3}{1917 \text{ cm}^3} \right)^{1,4} = 264 \text{ kPa}$$



Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

25/28 **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Diesel**

Ένας ιδανικός κύκλος Diesel με αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπίεσης 18 και λόγο αποκοπής 2. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε 100 kPa, 27°C και 1917 cm³. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα στο τέλος της κάθε διεργασίας, (β) το συνολικό έργο εξόδου και την θερμική απόδοση, και (γ) την μέση ενεργό πίεση.

(β) Το συνολικό έργο ενός κύκλου ισοδυναμεί με τη συνολική μεταφορά θερμότητας. Αρχικά όμως βρίσκουμε τη μάζα του αέρα:

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(100 \text{ kPa})(1.917 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K})} = 0,00223 \text{ kg}$$

Η διεργασία 2-3 είναι μια ισοβαρής διεργασία πρόσληψης θερμότητας, για την οποία το έργο ογκομεταβολής και ο όρος Δu, μπορούν να συνδυαστούν στον όρο Δh.

Επομένως,

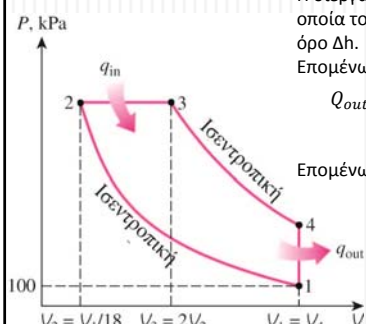
$$Q_{out} = m(u_4 - u_1) = mc_v(T_4 - T_1) = (0,00223 \text{ kg})(0,718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(791 \text{ K} - 300 \text{ K}) = 0,786 \text{ kJ}$$

Επομένως,

$$W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = 2,136 - 0,786 = 1,35 \text{ kJ}$$

Τότε η τιμή της θερμικής απόδοσης γίνεται

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{1,35 \text{ kJ}}{2,136 \text{ kJ}} = 0,632 \text{ ή } 63,2\%$$



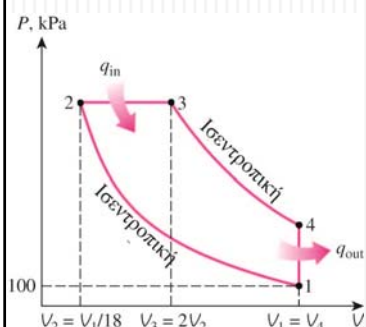
Κύκλος Diesel: Ο Ιδανικός Κύκλος των Μηχανών Ανάφλεξης με Συμπύεση

26/28 **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-2: Ο Ιδανικός Κύκλος Diesel**

Ένας ιδανικός κύκλος Diesel με αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει λόγο συμπίεσης 18 και λόγο αποκοπής 2. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε 100 kPa, 27°C και 1917 cm³. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου ψυχρού αέρα, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα στο τέλος της κάθε διεργασίας, (β) το συνολικό έργο εξόδου και την θερμική απόδοση, και (γ) την μέση ενεργό πίεση.

(γ) Η μέση ενεργός πίεση προσδιορίζεται από την εξίσωση ορισμού της:

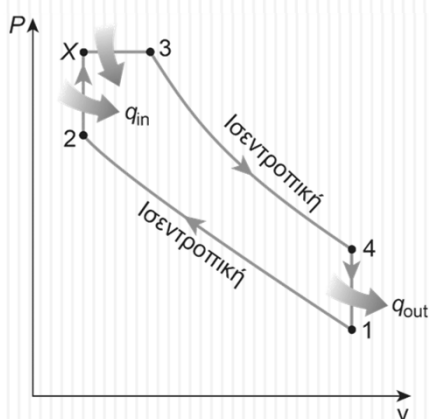
$$\text{MEP} = \frac{W_{net}}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{W_{net}}{V_1 - V_2} = \frac{1,35 \text{ kJ}}{(1917 - 106,5) \times 10^{-6} \text{ m}^3} \left(\frac{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}{1 \text{ kJ}} \right) = 746 \text{ kPa}$$



Κύκλος SEILIGER ή semi-DIESEL - Διπλός Κύκλος Otto+Diesel

27/28

Διπλός κύκλος: είναι ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο ιδανικού κύκλου για τους σύγχρονους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση



Διάγραμμα P-v ιδανικού διπλού κύκλου

Στους σύγχρονους ταχύστροφους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, το καύσιμο εγχύεται στο θάλαμο καύσης πολύ νωρίτερα σε σχέση με τις πρώιμες μηχανές Diesel.

Το καύσιμο αρχίζει να αναφλέγεται κατά τα τελευταία στάδια της συμπίεσης, συνεπώς μέρος της καύσης διεξάγεται υπό σταθερό όγκο.

Η έγχυση του καυσίμου συνεχίζεται μέχρι το καύσιμο να αγγίξει το ΑΝΣ κι η καύση του καυσίμου διατηρεί την πίεση σε υψηλά επίπεδα.

Δηλαδή, η όλη διεργασία της καύσης μοντελοποιείται καλύτερα ως ο συνδυασμός μιας ισόογκης και μιας ισόθλιπτης διεργασίας.

28/28

Ανακεφαλαίωση

- ❖ Βασική ανάλυση των κύκλων ισχύος αερίου
- ❖ Ο κύκλος Carnot κι η σημασία του
- ❖ Παραδοχές πρότυπου αέρα
- ❖ Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών
- ❖ Κύκλος Otto: ο ιδανικός κύκλος των μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα
- ❖ Κύκλος Diesel: ο ιδανικός κύκλος των μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση
- ❖ Κύκλος SEILIGER ή semi-DIESEL - Διπλός Κύκλος Otto+Diesel

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

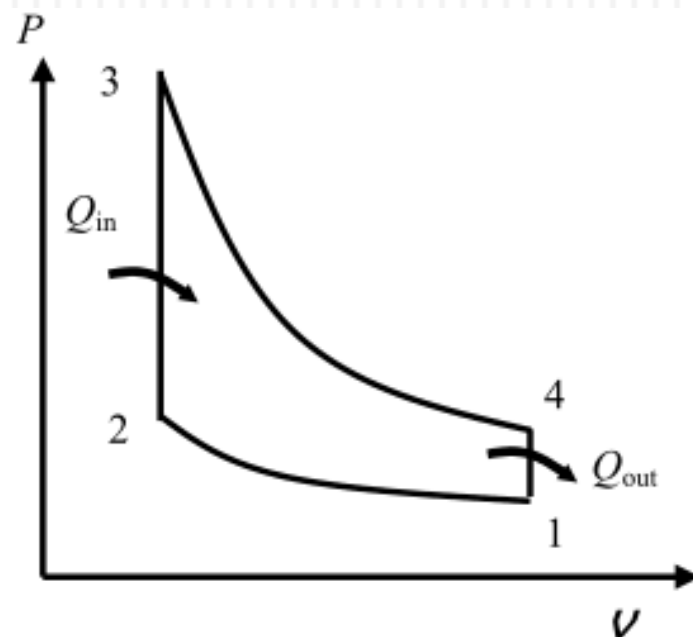
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ
ΚΥΚΛΟΙ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ
ΚΥΚΛΟΙ ΟΤΤΟ & DIESEL

Δρ. Α. Καρκάνης, ΕΤΕΠ
Εργαστήριο Ειδικής Μηχανολογίας

9.39

2/15

Ένας τετράχρονος τετρακύλινδρος βενζινοκινητήρας λειτουργεί σύμφωνα με τον κύκλο του Otto με λόγο συμπίεσης 11. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 37°C και η μέγιστη πίεση του κύκλου είναι 8 MPa. Οι διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως πολυτροπικές, με πολυτροπική σταθερά ίση με 1,3. Χρησιμοποιώντας σταθερές ειδικές θερμότητες σε θερμοκρασία 850 K, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία στο τέλος της διεργασίας εκτόνωσης, (β) το συνολικό έργο εξόδου και τη θερμική απόδοση, (γ) τη μέση ενεργό πίεση.



9.39

Ένας τετράχρονος τετρακύλινδρος βενζινοκινητήρας 1,6 L λειτουργεί σύμφωνα με τον κύκλο του Otto με λόγο συμπίεσης 11. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 37°C και η μέγιστη πίεση του κύκλου είναι 8 MPa. Οι διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως πολυτροπικές, με πολυτροπική σταθερά ίση με 1,3.

3/15

Χρησιμοποιώντας σταθερές ειδικές θερμότητες σε θερμοκρασία 850 K, να προσδιορίσετε

- (α) τη θερμοκρασία στο τέλος της διεργασίας εκτόνωσης,
- (β) το συνολικό έργο εξόδου και τη θερμική απόδοση,
- (γ) τη μέση ενεργό πίεση.

Properties The properties of air at 850 K are $c_p = 1.110 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $c_v = 0.823 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $R = 0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, and $k = 1.349$ (Table A-2b).

Analysis (a) Process 1-2: polytropic compression

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = (310 \text{ K})(11)^{1.3-1} = 636.5 \text{ K}$$

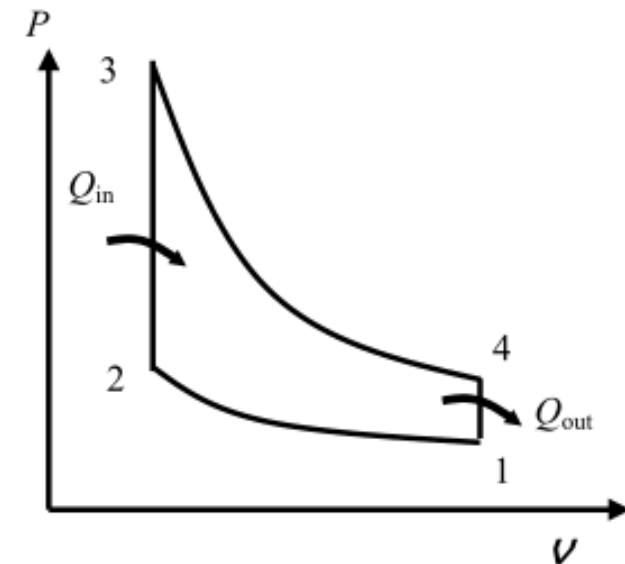
$$P_2 = P_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = (100 \text{ kPa})(11)^{1.3} = 2258 \text{ kPa}$$

$$w_{12} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} = \frac{(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(636.5 - 310)\text{K}}{1 - 1.3} = -312.3 \text{ kJ/kg}$$

Process 2-3: constant volume heat addition

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right) = (636.5 \text{ K}) \left(\frac{8000 \text{ kPa}}{2258 \text{ kPa}} \right) = 2255 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} q_{\text{in}} &= u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2) \\ &= (0.823 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(2255 - 636.5)\text{K} = 1332 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



9.39

4/15

Ένας τετράχρονος τετρακύλινδρος βενζινοκινητήρας 1,6 L λειτουργεί σύμφωνα με τον κύκλο του Otto με λόγο συμπίεσης 11. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης ο αέρας βρίσκεται σε 100 kPa και 37°C και η μέγιστη πίεση του κύκλου είναι 8 MPa. Οι διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως πολυτροπικές, με πολυτροπική σταθερά ίση με 1,3. Χρησιμοποιώντας σταθερές ειδικές θερμότητες σε θερμοκρασία 850 K, να προσδιορίσετε (α) τη θερμοκρασία στο τέλος της διεργασίας εκτόνωσης, (β) το συνολικό έργο εξόδου και τη θερμική απόδοση, (γ) τη μέση ενεργό πίεση.

Process 3-4: polytropic expansion.

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{n-1} = (2255 \text{ K}) \left(\frac{1}{11} \right)^{1.3-1} = \mathbf{1098 \text{ K}}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n = (8000 \text{ kPa}) \left(\frac{1}{11} \right)^{1.3} = 354.2 \text{ kPa}$$

$$w_{34} = \frac{R(T_4 - T_3)}{1 - n} = \frac{(0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1098 - 2255) \text{ K}}{1 - 1.3} = 1106 \text{ kJ/kg}$$

Process 4-1: constant volume heat rejection.

(b) The net work output and the thermal efficiency are

$$w_{\text{net,out}} = w_{34} - w_{12} = 1106 - 312.3 = \mathbf{794 \text{ kJ/kg}}$$

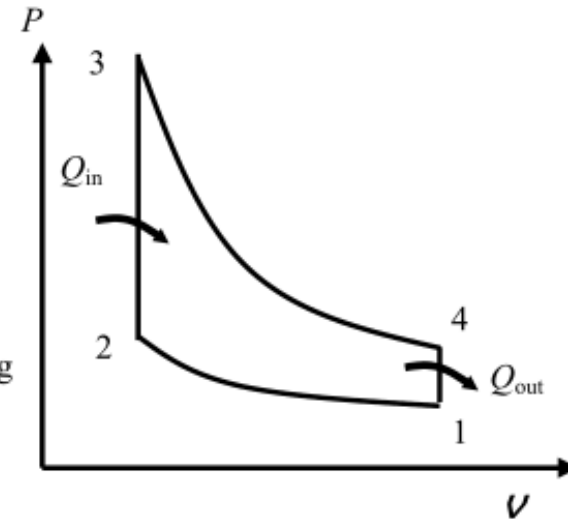
$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net,out}}}{q_{\text{in}}} = \frac{794 \text{ kJ/kg}}{1332 \text{ kJ/kg}} = 0.596 = \mathbf{59.6\%}$$

(c) The mean effective pressure is determined as follows

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(310 \text{ K})}{100 \text{ kPa}} = 0.8897 \text{ m}^3/\text{kg} = v_{\text{max}}$$

$$v_{\text{min}} = v_2 = \frac{v_{\text{max}}}{r}$$

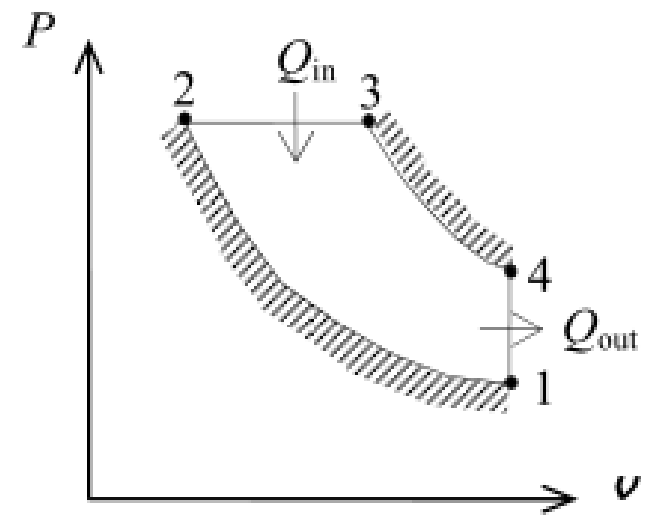
$$\text{MEP} = \frac{w_{\text{net,out}}}{v_1 - v_2} = \frac{w_{\text{net,out}}}{v_1(1 - 1/r)} = \frac{794 \text{ kJ/kg}}{(0.8897 \text{ m}^3/\text{kg})(1 - 1/11)} \left(\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kJ}} \right) = \mathbf{982 \text{ kPa}}$$



9.55

5/15

Μία δίχρονη τετρακύλινδρη μηχανή diesel 2,0 L που λειτουργεί σύμφωνα με τον ιδανικό κύκλο Diesel έχει λόγο συμπίεσης 22 και λόγο αποκοπής 1,8. Ο αέρας στη αρχή της διεργασίας συμπίεσης έχει θερμοκρασία 70°C και πίεση 97 kPa. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου κρύου αέρα, να προσδιορίσετε το ποσό της ισχύος που θα παραχθεί από τη μηχανή όταν αυτή λειτουργεί στις 2300 rpm.



9.55

Μία δίχρονη τετρακύλινδρη μηχανή diesel 2,0 L που λειτουργεί σύμφωνα με τον ιδανικό κύκλο Diesel έχει λόγο συμπίεσης 22 και λόγο αποκοπής 1,8. Ο αέρας στη αρχή της διεργασίας συμπίεσης έχει θερμοκρασία 70°C και πίεση 97 kPa. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές του πρότυπου κρύου αέρα, να προσδιορίσετε το ποσό της ισχύος που θα παραχθεί από τη μηχανή όταν αυτή λειτουργεί στις 2300 rpm.

6/15

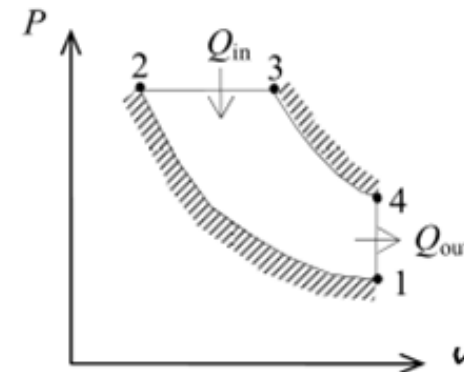
Properties The properties of air at room temperature are $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, and $k = 1.4$ (Table A-2).

Analysis Process 1-2: isentropic compression.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = (343 \text{ K})(22)^{0.4} = 1181 \text{ K}$$

Process 2-3: $P = \text{constant}$ heat addition.

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \longrightarrow T_3 = \frac{v_3}{v_2} T_2 = 1.8 T_2 = (1.8)(1181 \text{ K}) = 2126 \text{ K}$$



Process 3-4: isentropic expansion.

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{1.8 v_2}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{1.8}{r} \right)^{k-1} = (2126 \text{ K}) \left(\frac{1.8}{22} \right)^{0.4} = 781 \text{ K}$$

$$m = \frac{P_1 v_1}{RT_1} = \frac{(97 \text{ kPa})(0.0020 \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(343 \text{ K})} = 0.001971 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{in}} = m(h_3 - h_2) = mc_p(T_3 - T_2) = (0.001971 \text{ kg})(1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(2126 - 1181) \text{ K} = 1.871 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{out}} = m(u_4 - u_1) = mc_v(T_4 - T_1) = (0.001971 \text{ kg})(0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(781 - 343) \text{ K} = 0.6198 \text{ kJ}$$

$$W_{\text{net,out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = 1.871 - 0.6198 = 1.251 \text{ kJ/rev}$$

$$\dot{W}_{\text{net,out}} = \dot{n} W_{\text{net,out}} = (2300/60 \text{ rev/s})(1.251 \text{ kJ/rev}) = \mathbf{48.0 \text{ kW}}$$

Discussion Note that for 2-stroke engines, 1 thermodynamic cycle is equivalent to 1 mechanical cycle (and thus revolutions).