



3η Ομάδα Ασκήσεων

Βαθμός

Θερμοδυναμική

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Αλέξανδρος Δ. Γκότσης

Προθεσμία υποβολής : 15 Μαΐου, 2020

Όνομα:	
Αριθμός μητρώου:	

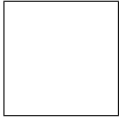
Απαντήστε τις ερωτήσεις χειρόγραφα στο χώρο που σας δίδεται ή στην πίσω πλευρά της κάθε σελίδας. Ψάξτε στο βιβλίο και στο eClass για δεδομένα που πιθανόν να λείπουν από τις ερωτήσεις. Προσοχή στις (σωστές) μονάδες. Όλες οι ερωτήσεις είναι ισοδύναμες, με 10 μονάδες για τη σωστή απάντηση, ενώ μη πλήρεις απαντήσεις θα παίρνουν ανάλογα λιγότερες μονάδες. Παρακαλώ να φέρετε τις απαντήσεις στο μάθημα μέχρι την ώρα που λήγει η προθεσμία υποβολής. **Εκπρόθεσμες υποβολές δεν μπορούν να γίνουν δεκτές.** Η βαθμολογία των ασκήσεων αυτών θα συνεισφέρει στον τελικό βαθμό του μαθήματος μόνο θετικά με 10%.

Η παράμετρος «Α1» στις ασκήσεις αντιστοιχεί στον αριθμό που σχηματίζουν τα δύο τελευταία ψηφία του αριθμού μητρώου σας, όπως καταγράφεται στην πρώτη σελίδα, και πρέπει να αντικατασταθεί από αυτόν.

Μην ξεχάσετε να γράψετε το όνομα, το επώνυμο, και τον αριθμό μητρώου σας. Αναφέρετε σαφώς όλες τις παραδοχές σας. Προσοχή στις σωστές μονάδες!

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

1. Να αποδειχθεί η ισοδυναμία των παρακάτω σχέσεων για ιδανικά αέρια με βάση την παραδοχή σταθερής ειδικής θερμοότητας:



$$s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \qquad s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Ιδανικά αέρια $\Rightarrow Pv = RT$

$$\begin{aligned} Tds &= du + Pdv \Rightarrow ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \\ \Rightarrow s_2 - s_1 &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} R \frac{dv}{v} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ Tds &= dh - vdP \Rightarrow ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T} = C_p \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P} \\ \Rightarrow s_2 - s_1 &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - \int_{P_1}^{P_2} R \frac{dP}{P} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned}$$

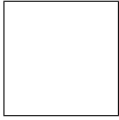
2. Να αποδείξετε ότι για ένα ιδανικό αέριο οι γραμμές σταθερής πίεσης σε ένα διάγραμμα $T - v$ είναι ευθείες γραμμές.



Ιδανικό αέριο $\Rightarrow$

$$Pv = RT \Rightarrow T = \frac{Pv}{R} \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_P = \frac{P}{R} = \text{const}$$

3. Για το ψυκτικό R-134a να επιβεβαιωθεί (χρησιμοποιήστε τους πίνακες ιδιοτήτων) η παρακάτω σχέση στους $(50 + A1)^\circ \text{C}$ και σε πίεση 1 MPa:



$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

$$\left(\frac{\Delta s}{\Delta P}\right)_T \approx -\left(\frac{\Delta v}{\Delta T}\right)_P \Rightarrow \left(\frac{s_2 - s_1}{P_2 - P_1}\right)_T \approx -\left(\frac{v_2 - v_1}{T_2 - T_1}\right)_P$$

Από πίνακες

$$\Rightarrow s \text{ σε } (T, \text{ και } P_2 = P + \delta P \text{ και } P_1 = P - \delta P)$$

$$\Rightarrow v \text{ σε } (P, \text{ και } T_2 = T + \delta T \text{ και } T_1 = T - \delta T)$$

Π.χ., $T_1 = 90^\circ \text{C}$ και $T_2 = 110^\circ \text{C}$ για $T = 100^\circ \text{C}$, και $P_1 = 0.9$ και $P_2 = 1.2$ MPa για $P = 1$ MPa.

4. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του Maxwell να εξαχθεί μια σχέση για την $\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T$ για ένα αέριο με καταστατική εξίσωση: $(P - \frac{a}{v^2})(v - b) = RT$.



Από κατ. εξίσωση: $\Rightarrow$

$$T = \frac{Pv}{R} - \frac{a}{Rv} - \frac{Pb}{R} + \frac{ab}{Rv^2}$$

$$P = \frac{RT}{v - b} + \frac{a}{v^2} \Rightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v - b} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v - b)^2} - \frac{2a}{v^3}$$

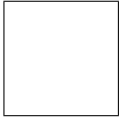
Από Maxwell $\Rightarrow$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v = -1 \Rightarrow -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T^{-1} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{-RT}{(v - b)^2} - \frac{2a}{v^3}\right)^{-1} \frac{R}{v - b}$$

5. Να υπολογισθούν με τη βοήθεια της εξίσωσης Clapeyron η ενθαλπία και η εντροπία εξαέρωσης (h_{fg} και s_{fg}) του υδρατμού στους $100 + A1$ °C και να συγκριθούν με τις τιμές των πινάκων.



Όπως παράδειγμα βιβλίου:

$$h_{fg} = T v_{fg} \left. \frac{dP}{dT} \right|_{@T_{sat}=100+A1}$$

Από Πίνακες $\Rightarrow v_{fg}$ σε $T_{sat} = T$

ΔT γύρω από το T

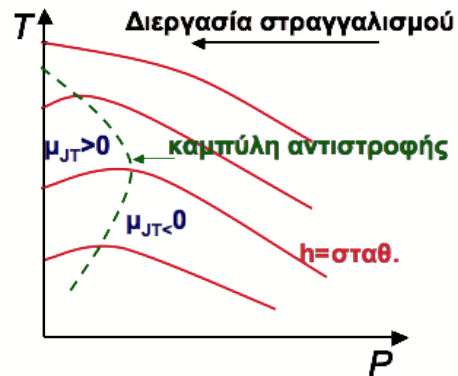
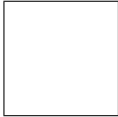
$$\Delta P = P_{sat@T-\Delta T} - P_{sat@T+\Delta T}$$

6. Πώς ορίζεται και ποια είναι η φυσική σημασία του συντελεστή Joule-Thomson;



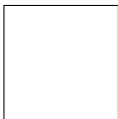
Δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας με την πτώση της πίεσης σε έναν ισενθαλπικό στραγγαλισμό.

7. Τί είναι η «γραμμή αντιστροφής» και η «μέγιστη θερμοκρασία αντιστροφής». Ποια είναι η σημασία της τελευταίας στις διεργασίες ψύξης;



Βλέπε την περιγραφή στο βιβλίο. Η μέγιστη θερμοκρασία αντιστροφής δείχνει το άνω όριο θερμοκρασιών για τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει η ουσία ως ψυκτικό.

8. Υδρατμός στραγγαλίζεται από $[4 + (A1/100)]$ MPa και 450°C σε $[2 + (A1/100)]$ MPa. Να υπολογιστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του υδρατμού κατά τη διεργασία αυτή και ο μέσος συντελεστής Joule-Thomson.



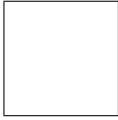
Από πίνακα υπέρθερμου ατμού κ.λπ.:

$$1. P_1, T_1 \Rightarrow h_1$$

$$2. P_2, h_2 = h_1 \Rightarrow T_2$$

$$\mu = \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1}$$

9. Να υπολογισθεί η ενθαλπία και η εντροπία του αζώτου στους (220 + A1) Κ και (8 + A1/10) MPa χρησιμοποιώντας τα γενικευμένα διαγράμματα της απόκλισης ενθαλπίας και εντροπίας (Σχ. A-29 και A-30).



Από πίνακα αζώτου ως ιδ. αέριο, $T \Rightarrow h^o, s^o$

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad T_R = \frac{P}{P_{cr}}, \quad \text{Σχ. A-29} \Rightarrow Z_h, Z_s$$

$$\bar{h} = \bar{h}^o - Z_h R_u T_{cr} \quad \bar{s} = \bar{s}^o - Z_s R_u$$

10. Προπάνιο συμπιέζεται ισόθερμα σε μια συσκευή εμβόλου κυλίνδρου από τους (100 + A1) °C και 1 MPa στα (4+A1/20) MPa. Χρησιμοποιώντας τα γενικευμένα διαγράμματα να υπολογισθούν η θερμοότητα και το έργο που εναλλάσσονται



$$\Delta u = q - w \quad T_{R_1} = \frac{T_1}{T_{cr}}$$

$$T_{R_1}, P_{R_1} \Rightarrow Z_1, Z_{h_1} \quad T_{R_1}, P_{R_2} \Rightarrow Z_2, Z_{h_2}$$

$$w = \int_1^2 P dv = - \int_1^2 \frac{ZRT}{v} dv = -Z_{ave} RT \ln v_2 v_1 = -Z_{ave} RT \ln \frac{Z_2 P_1}{Z_1 P_2}$$

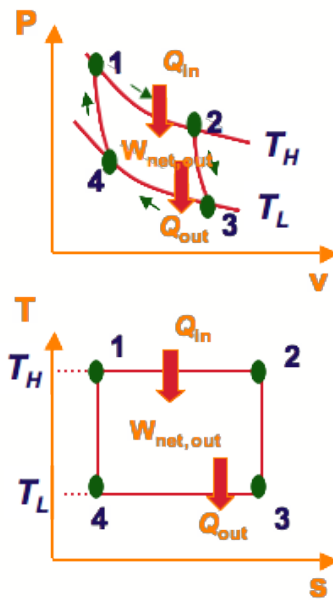
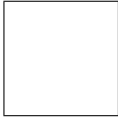
$$\text{Ιδανικό αέριο} \Rightarrow h^o = h^o(T)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2^o - h_1^o + RT_{cr}(Z_{h_1} - Z_{h_2}) = RT_{cr}(Z_{h_1} - Z_{h_2})$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \Delta h - \Delta(Pv) = RT_{cr}(Z_{h_1} - Z_{h_2}) - RT(Z_2 - Z_1)$$

$$\Delta u = q - w \Rightarrow q$$

11. Ένας κύκλος Carnot χρησιμοποιεί $[0.002 + (A1/20000)]$ kg αέρα ως ρευστό λειτουργίας μεταξύ των θερμοκρασιακών ορίων των 27 και 927 °C. Η μέγιστη και η ελάχιστη πίεση στον κύκλο είναι 1800 και 20 kPa αντίστοιχα. Να υπολογισθεί το καθαρό έργο εξόδου ανά κύκλο και η θερμική απόδοση του κύκλου. (Για τον αέρα θεωρήστε ότι $C_p = 1.005$ kJ/kg και $R = 0.287$ kPa m³ / kg K.)



$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\text{Ισεντρο. εκτόνωση } 2 \rightarrow 3 \Rightarrow \frac{T_H}{T_L} = \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{(k-1)/k} \Rightarrow P_3$$

$$W = \eta m q_{in} \quad q_{in} = T_H (s_2 - s_1) = T_H \left(C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right)$$

12. Ένας κύκλος αέρα περιλαμβάνει τις ακόλουθες διεργασίες:

1 → 2 : Ισεντροπική συμπίεση από τα 100 kPa και 11 °C σε 800 kPa

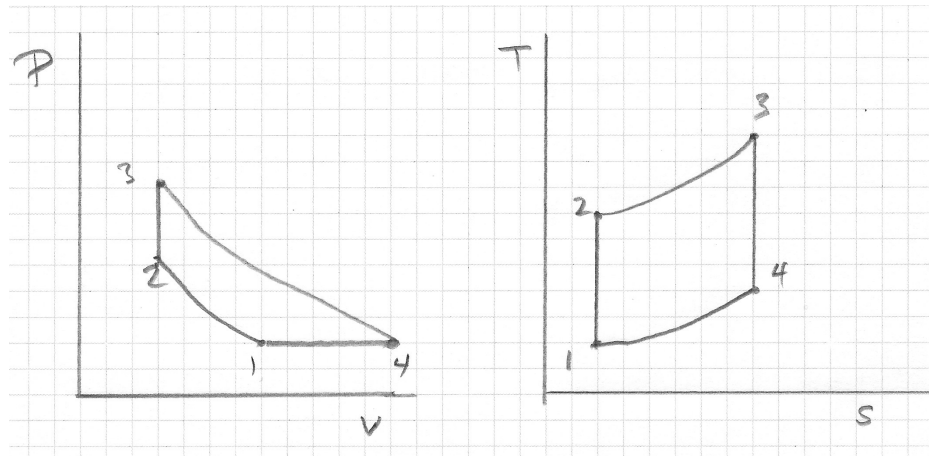
2 → 3 : Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας 1000 kJ

3 → 4 : Ισεντροπική εκτόνωση στα 100 kPa

4 → 1 : Ισοβαρής ανταλλαγή θερμότητας μέχρι την αρχική κατάσταση.

(Οι ειδικές θερμότητες του αέρα να μην θεωρηθούν σταθερές)

α)



Προσοχή:

Οι ισοβαρείς διεργασίες δίνουν οριζόντιες γραμμές στο (P,v) ενώ οι ισόχωρες κατακόρυφες.

Οι ισεντροπικές διεργασίες δίνουν κατακόρυφες γραμμές στο (T,s) ενώ οι ισοθερμοκρασιακές οριζόντιες.

β) Υπολογίστε το έργο που παράγεται.

$$1. T_1 \Rightarrow h_1, P_{r1}$$

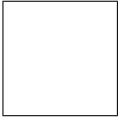
$$1 \rightarrow 2. \text{ Ισεντροπική σε } P_2 \Rightarrow \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow P_{r2}, u_2, T_2, h_2$$

$$2 \rightarrow 3. v_3 = v_2, q_{in} \Rightarrow u_3 - u_2 = q_{in} \Rightarrow u_3, T_3, P_{r3}, h_3 \Rightarrow P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2}$$

$$3 \rightarrow 4. \text{ Ισεντροπική σε } P_4 \Rightarrow \frac{P_{r4}}{P_{r3}} = \frac{P_4}{P_3} \Rightarrow h_4, T_4$$

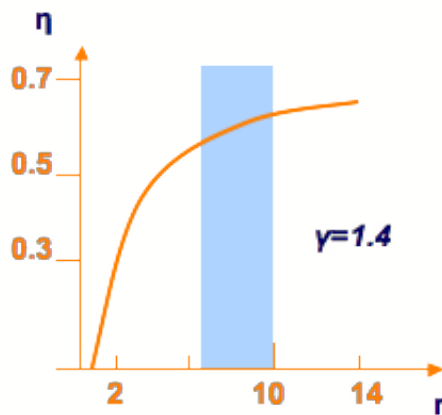
$$4 \rightarrow 1. P_1 = P_4 \Rightarrow q_{out} = h_4 - h_1 \Rightarrow w = q_{in} - q_{out}$$

13. Σχεδιάστε σχηματικά πως μεταβάλλεται η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Otto ως συνάρτηση: (α) του λόγου συμπίεσης [δηλ. σχεδιάστε το $\eta(r)$] και (β) του λόγου των ειδικών θερμοτήτων του αερίου λειτουργίας [δηλ. το $\eta(k)$].

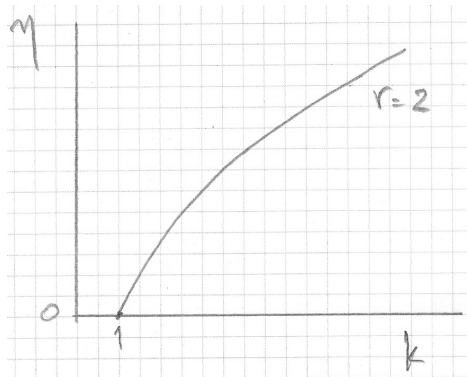


$$\eta = 1 - r^{1-k}$$

(α) Σχεδιάστε την τιμή του συντελεστή απόδοσης η (κατακόρυφος άξονας) ως συνάρτηση του λόγου συμπίεσης r (οριζόντιος άξονας) για κάποια σταθερή τιμή του k , π.χ. για αέρα ($k = 1.4$).

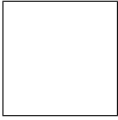


(β) Σχεδιάστε την τιμή του συντελεστή απόδοσης η (κατακόρυφος άξονας) ως συνάρτηση του λόγου των ειδικών θερμοτήτων, k , του αερίου (οριζόντιος άξονας) για κάποια σταθερή τιμή του r (π.χ. για $r = 10$).



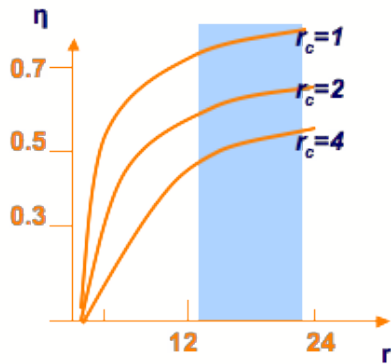
Προσέξτε τις ελάχιστες/μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν οι άξονες.

14. Σχεδιάστε σχηματικά πως μεταβάλλεται η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Diesel ως συνάρτηση (i) του λόγου συμπίεσης [δηλ. σχεδιάστε το $\eta(r)$] και (ii) του λόγου αποκοπής [δηλ. σχεδιάστε το $\eta(r_c)$].

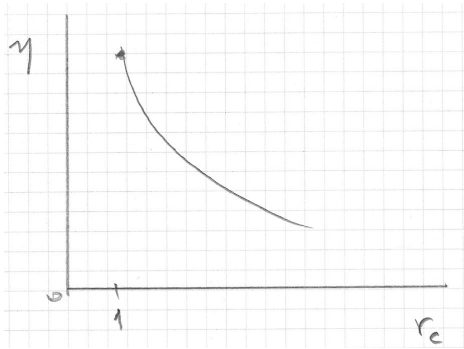


$$\eta = 1 - r^{1-k} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

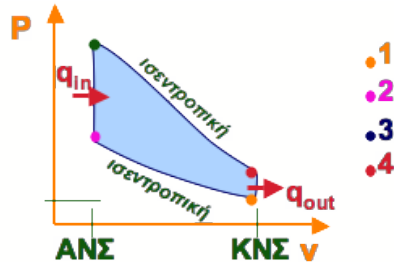
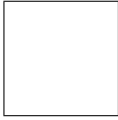
(α) Σχεδιάστε την τιμή του συντελεστή απόδοσης η (κατακόρυφος άξονας) ως συνάρτηση του λόγου συμπίεσης r (οριζόντιος άξονας) για μια σταθερή τιμή του k και του r_c .



(β) Σχεδιάστε την τιμή του συντελεστή απόδοσης η (κατακόρυφος άξονας) ως συνάρτηση του λόγου αποκοπής, r_c , (οριζόντιος άξονας) για κάποια σταθερή τιμή του r και του k . Προσέξτε τις ελάχιστες/μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν οι άξονες.



15. Ένας ιδανικός κύκλος Otto έχει λόγο συμπίεσης 8. Πριν τη διεργασία της ισεντροπικής συμπίεσης το αέριο έχει πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 290 K. Μετά την εκτόνωση η θερμοκρασία είναι (750+A1) K. Υπολογίστε τη μέγιστη θερμοκρασία και πίεση στον κύκλο. Για το αέριο λειτουργίας $C_v = 0.72 \text{ kJ/kg}$, $k = 1.4$.



$$1 \rightarrow 2. \text{ Ισεντρο.} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \Rightarrow u_2, \text{ και } P_2 = P_1 \frac{v_1}{v_2} \frac{T_2}{T_1}$$

$$2 \rightarrow 3. v_3 = v_2 = v_1/8$$

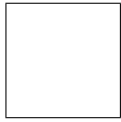
$$3 \rightarrow 4. \text{ ισεντροπική} \Rightarrow T_3 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{k-1} = T_4 (8)^{k-1} \Rightarrow u_3, P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2} \quad (\text{από } 2 \rightarrow 3)$$

$$q_{in} = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2)$$

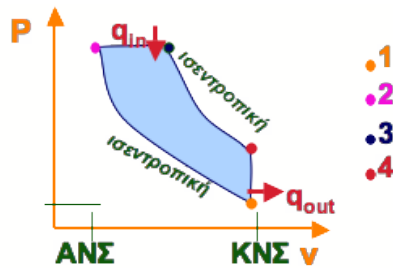
$$4 \rightarrow 1. q_{out} = u_4 - u_1 = C_v(T_4 - T_1)$$

$$w = q_{in} - q_{out}$$

16. Μία τετράχρονη, μονοκύλινδρη ιδανική μηχανή Diesel με αέρα ως μέσο λειτουργίας έχει όγκο 1 L, λόγο συμπίεσης 20 και λόγο αποκοπής 2.2. Πριν τη διεργασία της ισεντροπικής συμπίεσης ο αέρας έχει πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 300 K. Να υπολογισθεί πόση ισχύ θα δίνει η μηχανή στα (1000+10*A1) rpm.



Ο αέρας να θεωρηθεί ιδανικό αέριο με μη σταθερές ειδικές θερμοότητες C_p και C_v .



$$1. P_1, V_1, T_1 \Rightarrow m = \frac{P_1 V_1}{RT}$$

1-2. ισεντροπική, χωρίς σταθερές C_p και C_v :

$$T_1 \Rightarrow u_1, v_{r1} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \Rightarrow v_{r2} \Rightarrow T_2 \Rightarrow h_2$$

$$2 \rightarrow 3. \text{ ισοβαρής} \Rightarrow T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = T_2 r_c \Rightarrow h_3$$

$$Q_{in} = m(h_3 - h_2)$$

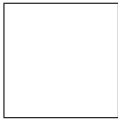
3-4. ισεντροπική:

$$T_3 \Rightarrow v_{r3} \Rightarrow \frac{v_3}{v_4} = \frac{r_c}{r} = \frac{v_{r3}}{v_{r4}} \Rightarrow v_{r4} \Rightarrow T_4 \Rightarrow u_4$$

$$4 \rightarrow 1. \text{ ισόχωρη:} \Rightarrow Q_{out} = m(u_4 - u_1)$$

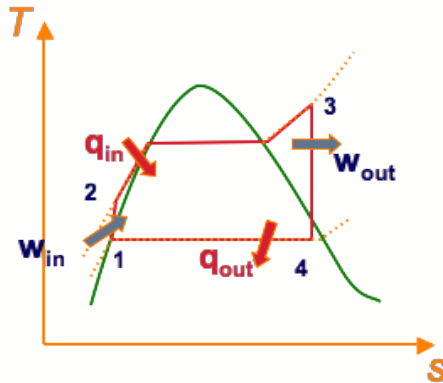
Καθώς ο κινητήρας είναι τετράχρονος, μόνοι οι μισές περιστροφές συνεισφέρουν στην ισχύ:

$$\dot{W} = 0.5n(Q_{in} - Q_{out}) \quad \text{όπου } n : [\text{rps}]$$



17. Σε μία μηχανή Rankine κυκλοφορούν $(10+0.25 \cdot A1)$ kg/s υδρατμού. Τα όρια πίεσης είναι 3 MPa και 50 kPa. Η θερμοκρασία του υδρατμού στην είσοδο του στροβίλου είναι 400°C . Να απεικονισθεί ο κύκλος σε διάγραμμα $T-s$ σε σχέση με τις γραμμές κορεσμού και να υπολογισθεί η θερμική απόδοση του κύκλου.

Σχεδιάστε τον κύκλο σε (T,s)



Σε κάθε κύκλο:

1. $h_1 = h_f, v_1 = v_f$

1->2. ισεντροπική συμπίεση $\Rightarrow w = v_1(P_2 - P_1) \Rightarrow h_1 - h_2 = w \Rightarrow h_2$

3. $P_3, T_3 \Rightarrow h_3, s_3$

2->3. Ισοθερμ. θέρμανση: συμπ. υγρό $\rightarrow$ εξάτμιση $\rightarrow$ υπερθ. ατμός

$$q_{in} = h_3 - h_2$$

3->4. ισεντροπική: $P_4, s_4 = s_3$

$$\Rightarrow x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} \Rightarrow h_4 = h_f + x_4 h_{fg}$$

4->1. ισόθερμη: $\Rightarrow q_{out} = h_4 - h_1$

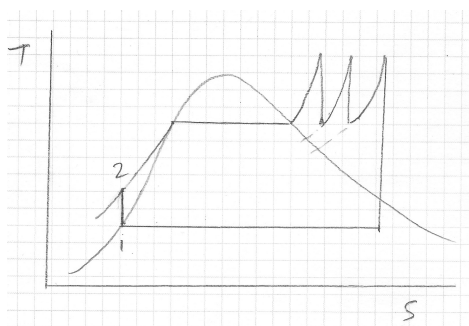
$$w_{net} = q_{in} - q_{out} - w_{in} \Rightarrow \dot{W} = \dot{m} w_{net}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_2}{h_3 - h_2}$$

18. Να σχεδιασθεί σε διάγραμμα $T - s$ ένας ιδανικός κύκλος Rankine με δύο βαθμίδες αναθέρμανσης. Πως μεταβάλλεται η απόδοση του κύκλου με το πλήθος των βαθμίδων αναθέρμανσης;



Σχεδιάστε τον κύκλο σε (T,s)



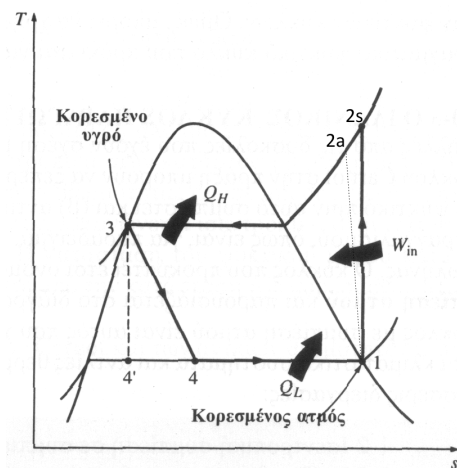
Αυξάνεται αλλά σε κάθε επόμενη αναθέρμανση η βελτίωση μικραίνει.

Χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτίωση της ποιότητας του ατμού στην έξοδο του στροβίλου.



19. Ένα ψυκτικό σύστημα ψυκτικής ισχύος 300 kJ/min χρησιμοποιεί R-134a ως ρευστό λειτουργίας, ενώ ο συμπιεστής του έχει αδιαβατική απόδοση 85%. Το ψυκτικό εισέρχεται ως κορεσμένος ατμός στα 140 kPa και συμπιέζεται στα $(700 + 2 \cdot A1)$ kPa. Να δειχθεί ο κύκλος σε διάγραμμα $T - s$ ως προς τις γραμμές κορεσμού, να υπολογιστεί η ποιότητα του ψυκτικού στο τέλος της διεργασίας στραγγαλισμού, ο COP του κύκλου και η ισχύς του συμπιεστή.

Σχεδιάστε τον κύκλο σε (T,s)



$$1: P_1 = P_{sat} \Rightarrow T_1, \quad h_1 = h_g, \quad s_1 = s_g$$

$$2: P = P_2 \quad \text{Αν ισεντροπική: } s_{2s} = s_1 \Rightarrow h_{2s}$$

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \Rightarrow h_{2a}$$

$$2 \rightarrow 3: P_3 = P_2 \Rightarrow h_3 = h_{f@P3}$$

$$3 \rightarrow 4: T_4 \quad h_4 = h_3 \Rightarrow x_4 = \frac{h_4 - h_f}{h_g - h_f}$$

$$COP = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2a} - h_1}$$

$$\dot{W}_{compr} = \frac{\dot{W}_{cool}}{COP}$$