



---

## Θερμοδυναμική

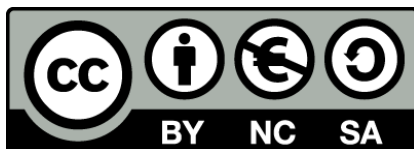
### Ενότητα 6: Παράδειγμα Κύκλου με Απομάστευση

Γεώργιος Κ. Χατζηκωνσταντής Επίκουρος Καθηγητής

Διπλ. Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός

Μ.Sc. "Διασφάλιση Ποιότητας", Τμήμα Ναυπηγικών Μηχανικών ΤΕ

---



Το περιεχόμενο του μαθήματος διατίθεται με άδεια Creative Commons εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (απομάστευση)**

Σε μια εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό νερού, με έναν προθερμαντήρα, ο ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο με πίεση  $p = 50 \text{ bar}$  και θερμοκρασία  $t = 460 \text{ }^\circ\text{C}$ . Μετά την εκτόνωση στο στρόβιλο, ο ατμός εξέρχεται με  $p = 0,05 \text{ bar}$  (πίεση συμπίκνωσης).

Να υπολογισθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης, το καθαρό ωφέλιμο έργο και η ισχύς.

Να γίνει σύγκριση του βαθμού απόδοσης με εκείνο του κύκλου χωρίς απομάστευση.

Θεωρείται παροχή ατμού  $1 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$ .

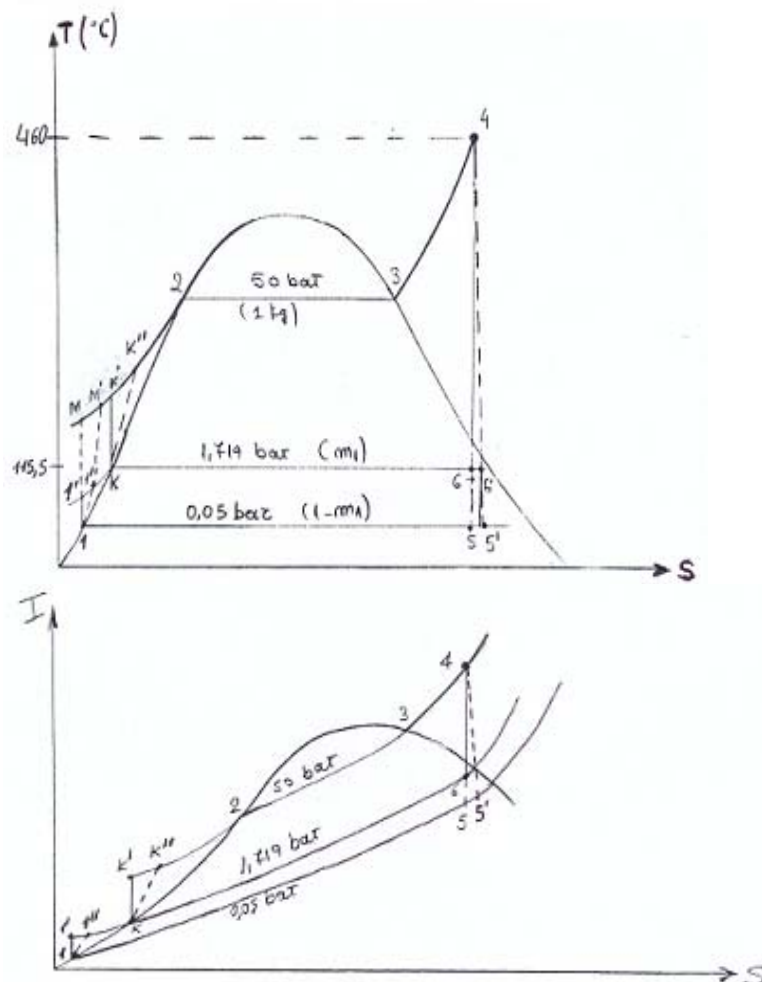
Λύση

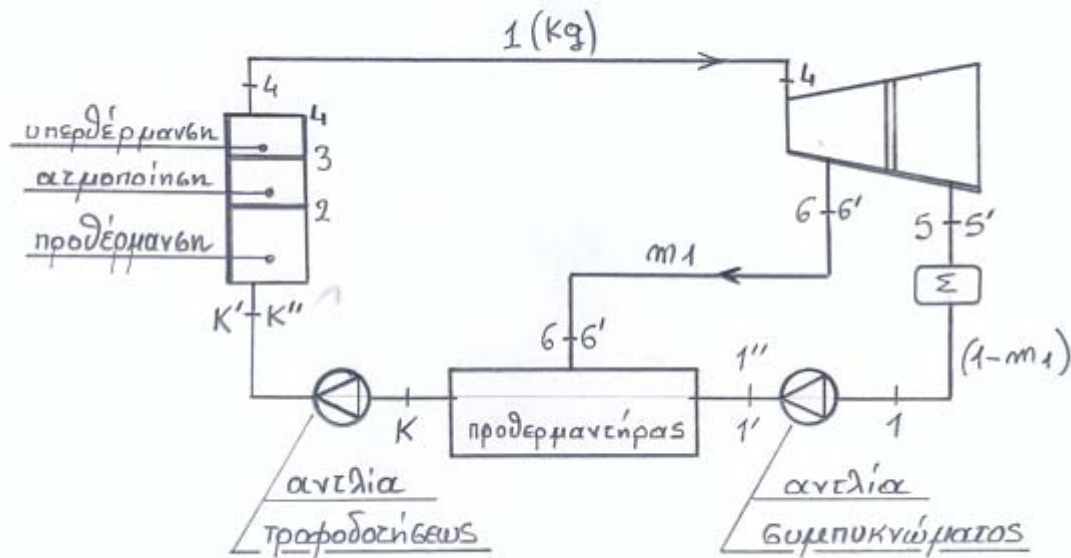
Η θερμοκρασία απομάστευσης είναι:  $t = \frac{t_{50\text{bar}} - t_{0,05\text{bar}}}{2} = \frac{263,91 - 32,88}{2} = 115,515 \text{ }^\circ\text{C}$

Η θερμοκρασία αυτή έχει αντίστοιχη πίεση (πίεση συνθήκης κορεσμού) που ευρίσκεται από τον πίνακα 4, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των θερμοκρασιών  $116 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$p = 1,6905 + \frac{1,7464 - 1,6905}{116 - 115} \cdot (115,515 - 115) = 1,719 \text{ bar}$$

Στην πίεση αυτή η ισοεντροπική εκτόνωση καταλήγει στην περιοχή του μίγματος με βαθμό ξηρότητας μεγαλύτερο από 0,90 που είναι αποδεκτός για την απρόσκοπτη λειτουργία του στρόβιλου.





Με αναφορά στο παραπάνω σχήμα, ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta = \frac{[1 \cdot (I_4 - I_6) + (1 - m_1) \cdot (I_6 - I_5)] - [(1 - m_1) \cdot (I_{1'} - I_1) + 1 \cdot (I_{K'} - I_K)]}{1 \cdot (I_4 - I_{K'})}$$

- **σημείο 4** : για πίεση = 50 bar και θερμοκρασία = 460°C, από τον **πίνακα 8** είναι :

$$I_4 = 3339 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right) \text{ και } S_4 = 6,848 \left( \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$$

- **σημείο 6'** : προσδιορίζεται υπολογίζοντας την ενθαλπία του σημείου χρησιμοποιώντας τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της εκτόνωσης, δηλαδή :

$$\eta_{\text{στρ.}} = \frac{I_4 - I_6}{I_4 - I_6} \Rightarrow I_6 = I_4 - \eta_{\text{στρ.}} \cdot (I_4 - I_6) \text{ και } \eta \text{ ενθαλπία του σημείου 6 υπολογίζεται από τη}$$

$$\text{σχέση για ενθαλπία μίγματος: } I_6 = (I_K)_{1,719 \text{ bar}} + (r)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6,$$

όπου ο βαθμός ξηρότητας στο σημ. 6 υπολογίζεται είτε γραφικά εάν από το σημείο τομής της κατακόρυφης (αδιαβατική ισοεντροπική  $\overline{64}$ ) από το σημ. 4 με την ισοβαρή 1,719 bar διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, είτε αναλυτικά δηλαδή :

Από την ισοεντροπική  $\overline{64}$  είναι :

$$S_4 = S_6 = (S_K)_{1,719 \text{ bar}} + \left( \frac{r}{T} \right)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6, \text{ από την οποία λύνοντας ως προς το βαθμό ξηρότητας είναι :}$$

$$x_6 = \frac{S_4 - S_K}{\left( \frac{r}{T} \right)}$$

Από τον πίνακα 5 για πίεση  $p = 1,719 \text{ bar}$  προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

$$S_{\sigma} = S_K = 1,478 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right), \quad I_{\sigma} = I_K = 484,6 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), \quad r = 2214,5 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), \quad T = 389,65 \text{ (} ^\circ\text{K)}$$

Με τις παραπάνω τιμές :  $x_6 = 0,942$ ,  $I_6 = 2570,659 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$ ,  $I_6 = 2685,91 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$

Από τον πίνακα 5 προκύπτει ότι :

$2685,91 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right) = I_6 < (I_V)_{1,719 \text{ bar}} = 2700 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$ , δηλαδή το σημείο 6' ευρίσκεται στην περιοχή του μίγματος και ο βαθμός ξηρότητας του σημείου υπολογίζεται :

- **είτε γραφικά** με την τιμή της ενθαλπίας  $I_6$  στο διάγραμμα (I-S) και χαράσσοντας την οριζόντια μέχρι την ισοβαρή καμπύλη 1,719 bar οπότε εάν διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας είναι ο ζητούμενος. Στην προκείμενη περίπτωση αυτή η μέθοδος δεν είναι εφαρμόσιμη διότι στο διάγραμμα (I-S), δεν υπάρχει χαραγμένη η ισοβαρής καμπύλη 1,719 bar
- **είτε αναλυτικά** χρησιμοποιώντας τη σχέση για την ενθαλπία μίγματος :

$$I_6 = (I_{\sigma})_{1,719 \text{ bar}} + (r)_{1,719 \text{ bar}} \cdot x_6 \Rightarrow x_6 = \frac{I_6 - I_K}{r} \Rightarrow x_6 = \frac{2685,910 - 484,6}{2214,5} = 0,994 > 0,88$$

**σημείο 5 :**  $I_5 = (I_{\sigma})_{0,05 \text{ bar}} + (r)_{0,05 \text{ bar}} \cdot x_5$ , όπου  $(I_{\sigma})_{0,05 \text{ bar}} = I_1$

όπου ο βαθμός ξηρότητας στο σημ. 5 υπολογίζεται είτε γραφικά εάν από το σημείο τομής της κατακόρυφης (αδιαβατική ισοεντροπική  $\overline{45}$ ) από το σημ. 4 με την ισοβαρή 0,05 bar διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, είτε αναλυτικά δηλαδή :

Από την ισοεντροπική  $\overline{54}$  είναι :

$$S_4 = S_5 = (S_{\sigma})_{0,05 \text{ bar}} + \left( \frac{r}{T} \right)_{0,05 \text{ bar}} \cdot x_5, \quad [\text{όπου } (S_{\sigma})_{0,05 \text{ bar}} = S_1] \text{ από την οποία λύνοντας ως προς το βαθμό ξηρότητας είναι : } x_5 = \frac{S_4 - S_1}{\left( \frac{r}{T} \right)}$$

Από τον πίνακα 5 για πίεση  $p = 0,05 \text{ bar}$  προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

$$S_1 = 0,4761 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right), \quad I_1 = 137,83 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), \quad r = 2423 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), \quad T = 306,03 \text{ (} ^\circ\text{K)}$$

Με τις παραπάνω τιμές :  $x_5 = 0,804$ ,  $I_5 = 2086 \left( \frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$

Επειδή η εκτόνωση (όπως και η συμπίεση) είναι πραγματική μεταβολή, για να διαπιστωθεί η κατάσταση του συστήματος στο τέλος της πραγματικής εκτόνωσης δηλαδή στο σημείο 5', υπολογίζεται η ενθαλπία  $I_6$  από τη σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου, όπως έχει γίνει στην περίπτωση του σημείου 6' στη σελίδα 178. Με ανάλογο λοιπόν τρόπο, ευρίσκεται ότι :  $x_5 = 0,881 > 0,88$ , τιμή οριακά αποδεκτή για την απρόσκοπτη λειτουργία του στροβίλου.

**σημείο K :** το σύστημα είναι κεκορεσμένο υγρό σε πίεση 1,719 bar, οπότε από τον πίνακα 5 είναι :

$$I_K = 484,6 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), \quad v_K = 0,0010563 \left( \frac{m^3}{kg} \right).$$

Η ενθαλπία  $I_{K'}$  ευρίσκεται από τη σχέση της αντλίας, δηλαδή :

$$I_{K'} = I_K + v_K \cdot (p_{K'} - p_K) = 484,6 + 0,0010563 \cdot (50 - 1,719) \cdot 10^2 = 489,7 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

και η ενθαλπία του σημείου K'' (το τέλος της αδιαβατικής πραγματικής συμπίεσης) ευρίσκεται χρησιμοποιώντας τη σχέση για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της αντλίας, δηλαδή :

$$\eta_{αντλ.} = \frac{I_{K'} - I_K}{I_{K''} - I_K} \Rightarrow I_{K''} = I_K + \frac{I_{K'} - I_K}{\eta_{αντλ.}} = 490,975 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), \quad (\text{όπου } \eta_{αντλ.} = 0,80)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, υπολογίζονται οι τιμές των ενθαλπιών  $I_{1''}, I_{1'}$  :

$$I_{1'} = 138 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), \quad I_{1''} = 138,042 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

**Πρέπει να υπολογισθεί η ποσότητα  $m_1$  που απομαστεύεται.** Η ποσότητα αυτή προκύπτει από το θερμικό ισολογισμό του προθερμαντήρα :

$$m_1 \downarrow I_6$$

$$1(kg) \cdot I_K \leftarrow \boxed{\text{προθερμαντήρας}} \leftarrow (1 - m_1) \cdot I_{1''}$$

$$1 \cdot I_K = m_1 \cdot I_6 + (1 - m_1) \cdot I_{1''}$$

και από τη σχέση αυτή προκύπτει η τιμή της απομαστευόμενης ποσότητας :

$$m_1 = \frac{I_K - I_{1''}}{I_6 - I_{1''}} = \frac{484,6 - 138,042}{2685,91 - 138,042} = 0,136 \left( \frac{kg}{kg_{ατμού}} \right)$$

**ΕΡΓΟ**

Υπολογίζεται η θερμική ενέργεια που διατίθεται μετά την εκτόνωση, θεωρώντας ότι ένα μέρος αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των αντλιών.

$$L_{\sigma\tau\rho.} = 1 \cdot (I_4 - I_6) + (1 - m_1) \cdot (I_6 - I_5) \\ = 1 \cdot (3339 - 2685,91) + (1 - 0,136) \cdot (2685,91 - 2274) = 1009 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

$$L_{\alpha\nu\tau\lambda\acute{\iota}\omega\nu} = \frac{(1 - m_1) \cdot (I_1 - I_1)}{0,80} + \frac{1 \cdot (I_{K'} - I_K)}{0,80} = \\ = \frac{(1 - 0,136) \cdot (138,042 - 137,83)}{0,80} + \frac{1 \cdot (490,975 - 484,6)}{0,80} = 8,2 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

$$\text{Καθαρή ενέργεια : } (1009 - 8,2) \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

$$\underline{\text{Ισχύς : }} N = 1 \cdot (kg) \cdot 1000,8 \left( \frac{KJoule}{kg} \right) \cdot \frac{1}{3600} \left( \frac{h}{\text{sec}} \right) = 0,278 \text{ (KWatt)}$$

**Θερμικός βαθμός απόδοσης :**

$$\eta = \frac{L_{\sigma\tau\rho.} - L_{\alpha\nu\tau\lambda.}}{(I_4 - I_{K'})} = \frac{1000,8}{3339 - 490,975} = 0,351$$

**ΚΥΚΛΟΣ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ**

$$\eta_g = \frac{I_4 - I_5}{I_4 - I_{M'}}, \text{ όπου } I_4 = 3339 \left( \frac{KJoule}{kg} \right), I_6 = 2274 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

$$\eta_{\alpha\nu\tau\lambda.} = \frac{I_M - I_1}{I_{M'} - I_1} \Rightarrow I_{M'} = I_1 + \frac{I_M - I_1}{\eta_{\alpha\nu\tau\lambda.}}$$

$$I_M = I_1 + v_1 \cdot (p_M - p_1) = 137,83 + 0,0010053 \cdot (50 - 0,05) \cdot 10^2 = 142,851 \left( \frac{KJoule}{kg} \right)$$

$$\eta_g = \frac{3339 - 2274}{3339 - 144,106} = 0,329$$

Από το παραπάνω αποτέλεσμα, διαπιστώνεται ότι η διαδικασία της απομάστευσης (με ένα προθερμαντήρα στο συγκεκριμένο παράδειγμα) προσφέρει μια μικρή αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

# Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

## Τέλος Ενότητας

### Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Αθήνας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

### Σημειώματα

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright TEI Αθήνας, Γεώργιος Χατζηκωνσταντής, 2014. Γεώργιος Χατζηκωνσταντής.  
«Θερμοδυναμική. Ενότητα 6: Παράδειγμα Κύκλου με Αποσμάστευση». Έκδοση: 1.0. Αθήνα  
2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [ocp.teiath.gr](http://ocp.teiath.gr).

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

- Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:
  - Το Σημείωμα Αναφοράς
  - Το Σημείωμα Αδειοδότησης
  - Τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
  - Το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει) μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.