



ΜΠ 329: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΑΣΚΗΣΕΙΣ # 7

Αφροδίτη Παπαδοπούλου
Δρ. Χημικός Μηχανικός
afpapadopoulou@isc.tuc.gr

ΜΠ 329: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



Ισοδυναμία Ισοζυγίου Ενέργειας & 1^{ος} Θ. Νόμος
Ισοζύγιο Ενέργειας:

Είσοδος = Έξοδος

$$H_{in} + E_{K,in} + E_{\Delta,in} + Q_{in} + W_{in} = H_{out} + E_{K,out} + E_{\Delta,out} + Q_{out} + W_{out} \quad \text{ΟΛΟΙ οι όροι } > 0$$

$$Q_{in} - Q_{out} + W_{in} - W_{out} = H_{out} - H_{in} + E_{K,out} - E_{K,in} + E_{\Delta,out} - E_{\Delta,in}$$

$$(Q_{in} - Q_{out}) - (W_{out} - W_{in}) = (H_{out} - H_{in}) + (E_{K,out} - E_{K,in}) + (E_{\Delta,out} - E_{\Delta,in})$$

$$Q - W = (H_{out} - H_{in}) + (E_{K,out} - E_{K,in}) + (E_{\Delta,out} - E_{\Delta,in}) \quad \text{1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος}$$

ΣΥΜΒΑΣΗ	$Q = (Q_{in} - Q_{out})$	$Q > 0 \Rightarrow Q_{in} > Q_{out}$	Θερμότητα «μπαίνει» στον Ο.Ε.
		$Q < 0 \Rightarrow Q_{in} < Q_{out}$	Θερμότητα «βγαίνει» από Ο.Ε.
	$W = (W_{out} - W_{in})$	$W > 0 \Rightarrow W_{in} < W_{out}$	Έργο «παράγεται»
		$W < 0 \Rightarrow W_{in} > W_{out}$	Έργο «καταναλώνεται»

ΜΠ 329: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΙΔΑΝΙΚΟΣ (Αντιστρεπτός - *reversible*) ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος Carnot
Θερμική Μηχανή (th) Αντίστροφος Κύκλος Carnot
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)

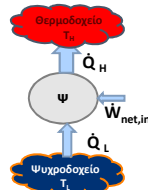
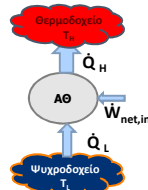
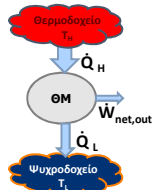
Επιδιωκόμενο Αποτέλεσμα:
Παραγωγή Έργου ($W_{net,out}$)

Επιδιωκόμενο Αποτέλεσμα:
Απόρριψη θερμότητας στο
θερμοδοχείο (Q_H), δηλ. θέρμανση

Επιδιωκόμενο Αποτέλεσμα:
Απαγωγή θερμότητας από το
ψυχοδοχείο (Q_L), δηλ. ψύξη

Απαιτούμενη είσοδος:
Πρόσληψη Θερμότητας
από θερμοδοχείο (Q_H)

Απαιτούμενη είσοδος:
Κατανάλωση Έργου ($W_{net,in}$)

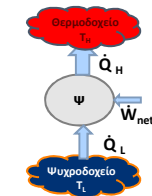
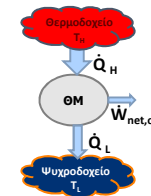


ΜΠ 329: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΙΔΑΝΙΚΟΣ (Αντιστρεπτός - *reversible*) ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος Carnot
Θερμική Μηχανή (th) Αντίστροφος Κύκλος Carnot
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)



Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\dot{Q}_H = \dot{W}_{net,out} + \dot{Q}_L$$

Σχέση Θερμότητας Θερμοκρασίας (Ισχύει και στις τρεις εφαρμογές ΙΔΑΝΙΚΟΥ κύκλου)

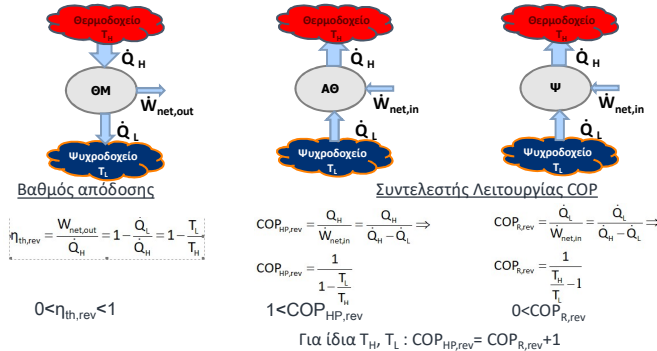
$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: Οι θερμοκρασίες T πάντα σε
KELVIN (απόλυτη θερμοκρασία)



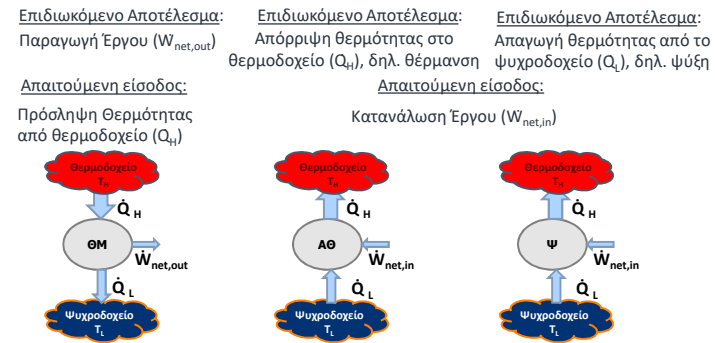
ΙΔΑΝΙΚΟΣ (Αντιστρεπτός - reversible) ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος Carnot
Θερμική Μηχανή (th) **Αντίστροφος Κύκλος Carnot**
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)



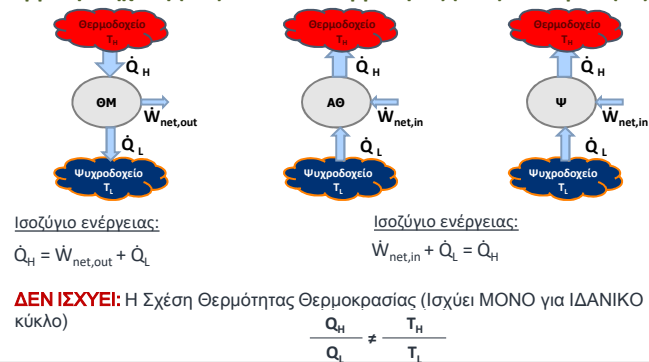
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος
Θερμική Μηχανή (th) **Αντίστροφος Κύκλος**
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)



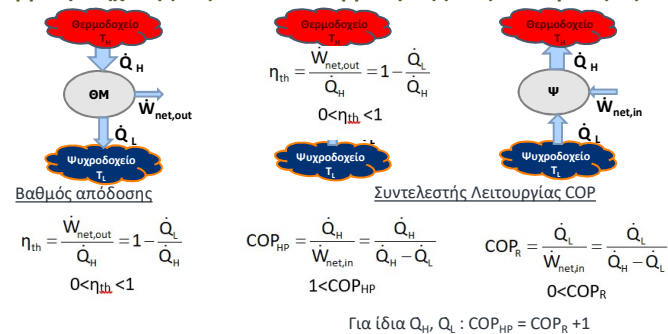
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος
Θερμική Μηχανή (th) **Αντίστροφος Κύκλος**
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)



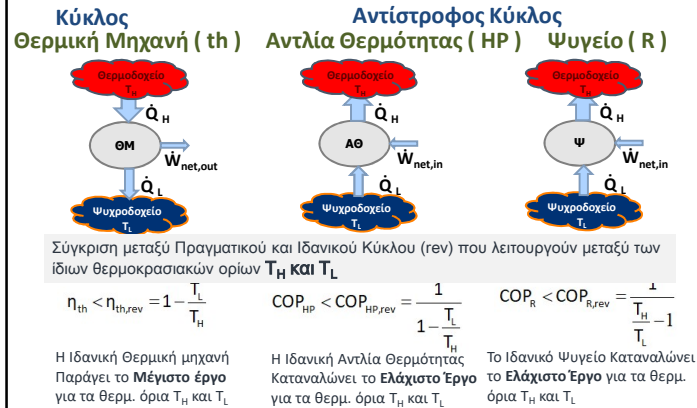
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Κύκλος
Θερμική Μηχανή (th) **Αντίστροφος Κύκλος**
Αντλία Θερμότητας (HP) Ψυγείο (R)





ΙΔΑΝΙΚΟΣ VS ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ



ΑΣΚΗΣΗ 7.1:

Μια θερμική μηχανή Carnot έχει θερμική απόδοση 55%. Η μηχανή απορρίπτει θερμότητα στη γειτονική λίμνη θερμοκρασίας 15°C με ρυθμό 800 kJ/min. Να προσδιοριστεί (α) η ισχύς της μηχανής (β) η ρυθμός θερμότητας που εισέρχεται στη μηχανή και (γ) η θερμοκρασία του θερμοδοχείου.

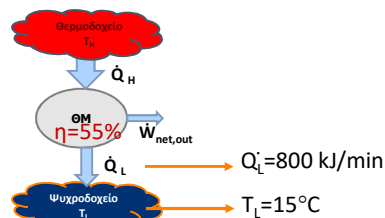


ΑΣΚΗΣΗ 7.1:

Δεδομένα

$\eta = 55\%$
 $T_L = 15^\circ\text{C}$
 $Q_L = 800 \text{ kJ/min}$

$W = ?$
 $T_H = ?$
 $Q_H = ?$



Η απόλυτη θερμοκρασία του ψυχοδοχείου είναι $T_L = 15 + 273 = 288 \text{ K}$.



ΑΣΚΗΣΗ 7.1:

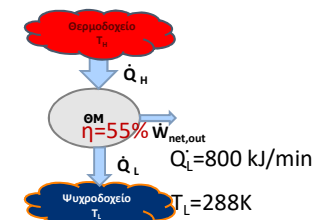
(α) Ισχύς της Θερμικής μηχανής

Η απόδοση σε συνδυασμό με το ισοζύγιο ενέργειας της θερμικής μηχανής, δηλ.

$$Q_H = W_{net,out} + Q_L$$

δίνει:

$$\eta_{th,rev} = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = \frac{W_{net,out}}{W_{net,out} + Q_L} \Rightarrow$$



$$W_{net,out} = \frac{\eta_{th,rev}}{1 - \eta_{th,rev}} Q_L = \frac{0.55}{1 - 0.55} 800 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} \Rightarrow W_{net,out} = 16.3 \text{ kW}$$



ΑΣΚΗΣΗ 7.1:

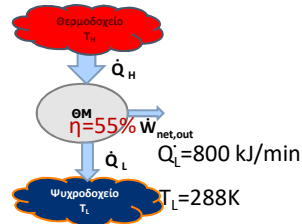
(β) Ρυθμός Θερμότητας που εισέρχεται στη ΘΜ

Με βάση το ισοζύγιο ενέργειας της θερμικής μηχανής,

$$\dot{Q}_H = \dot{W}_{\text{net,out}} + \dot{Q}_L = \frac{0.55}{1-0.55} 800 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} + 800 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} \Rightarrow \dot{Q}_H = 1778 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}$$

Ή από τον ορισμό του βαθμού απόδοσης και το $\dot{W}_{\text{net,out}}$

$$\eta_{\text{th,rev}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{Q}_H}$$



ΑΣΚΗΣΗ 7.1:

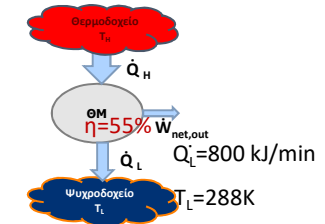
(γ) Η θερμοκρασία του θερμοδοχείου

Εφόσον είναι ιδανική μηχανή (μηχανή Carnot) ισχύει η σχέση:

$$\eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow T_H = \frac{T_L}{1 - \eta_{\text{th,rev}}} = \frac{288\text{K}}{1 - 0.55} \Rightarrow T_H = 640\text{K}$$

ή εναλλακτικά

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = \frac{T_H}{T_L} \Rightarrow T_H = T_L \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = 288\text{K} \frac{1778}{800} \Rightarrow T_H = 640\text{K}$$



ΑΣΚΗΣΗ 7.2:

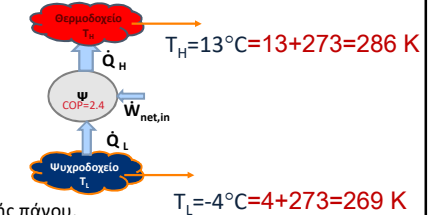
Νερό εισέρχεται σε μια παγομηχανή στους 13°C και εξέρχεται ως πάγος στους -4°C. Εάν ο COP της παγομηχανής κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας είναι 2.4, να προσδιορίσετε την απαιτούμενη ισχύ εισόδου για ρυθμό παραγωγής πάγου 12 kg/s. Δίνεται ότι χρειάζεται η απομάκρυνση 393 kJ ενέργειας από κάθε kg νερού στους 13°C για να μετατραπεί σε πάγο στους -4°C. Ποια θα ήταν η απαίτηση σε ισχύ εισόδου αν η παγομηχανή λειτουργούσε ιδανικά;



ΑΣΚΗΣΗ 7.2:

Δεδομένα:

$$\begin{aligned} T_H &= 13^\circ\text{C} \\ T_L &= -4^\circ\text{C} \\ \text{COP} &= 2.4 \\ \dot{m} &= 12 \text{ kg/s} \\ \Delta h &= 393 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Με βάση τα δεδομένα παραγωγής πάγου, ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας από το νερό για αυτήν την παραγωγή είναι:

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \Delta h = 12 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 393 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 4716 \text{ kW}$$



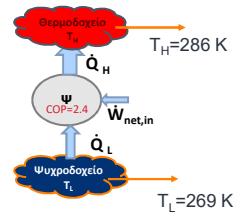
ΑΣΚΗΣΗ 7.2:

(α) Απαιτούμενη ισχύς εισόδου

Εφόσον έχουμε τον ρυθμό απομάκρυνσης θερμότητας από το νερό, και τον συντελεστή λειτουργίας

$$\text{COP}_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{net,in}}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{net,in}} = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_R} =$$

$$\frac{4716 \text{ kW}}{2.4} \Rightarrow \dot{W}_{\text{net,in}} = \mathbf{1965 \text{ kW}}$$



ΑΣΚΗΣΗ 7.2:

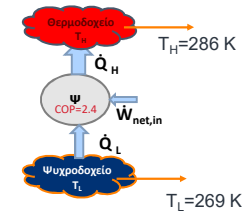
(β) Απαιτούμενη ισχύς εισόδου σε ιδανική μηχανή

Στην περίπτωση αυτή, ο Συντελεστής Λειτουργίας του ψυγείου (πρόκειται για ιδανικό) είναι:

$$\text{COP}_{R,\text{rev}} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} = \frac{1}{\frac{286 \text{ K}}{269 \text{ K}} - 1} = 15.8$$

$$\text{Επομένως: } \frac{\text{COP}_R}{\text{COP}_{R,\text{rev}}} = \frac{2.4}{15.8} = 0.15$$

$$\dot{W}_{\text{net,in,rev}} = 0.15 \dot{W}_{\text{net,in}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{net,in,rev}} = 0.15 * 1965 \text{ kW} \Rightarrow \dot{W}_{\text{net,in,rev}} = \mathbf{295 \text{ kW}}$$



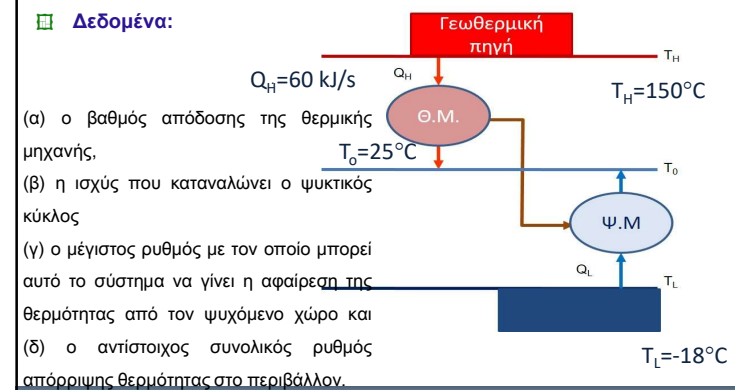
ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

Ένα σύστημα παραγωγής ψύξης που λειτουργεί με απορρόφηση θερμότητας, προμηθεύεται θερμότητα από μια γεωθερμική πηγή θερμοκρασίας 150° C, με ρυθμό 60 kJ/s. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 25° C και ο ψυχόμενος χώρος διατηρείται στους -18° C. Να καθοριστεί (α) ο βαθμός απόδοσης της θερμικής μηχανής, (β) η ισχύς που καταναλώνει ο ψυκτικός κύκλος (γ) ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο μπορεί αυτό το σύστημα να γίνει η αφαίρεση της θερμότητας από τον ψυχόμενο χώρο και (δ) ο αντίστοιχος συνολικός ρυθμός απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον.



ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

Δεδομένα:



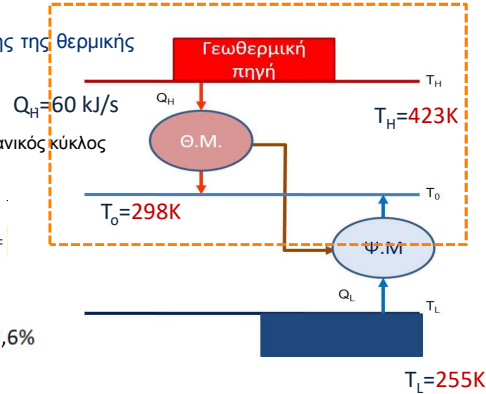
- (α) ο βαθμός απόδοσης της θερμικής μηχανής,
 (β) η ισχύς που καταναλώνει ο ψυκτικός κύκλος
 (γ) ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο μπορεί αυτό το σύστημα να γίνει η αφαίρεση της θερμότητας από τον ψυχόμενο χώρο και
 (δ) ο αντίστοιχος συνολικός ρυθμός απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον.


ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

(α) ο βαθμός απόδοσης της θερμικής μηχανής,

ο μέγιστος ρυθμός $\Rightarrow$ Ιδανικός κύκλος

$$\eta_{th}^{id} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) = \left(1 - \frac{298}{423}\right) = 29,6\%$$


ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

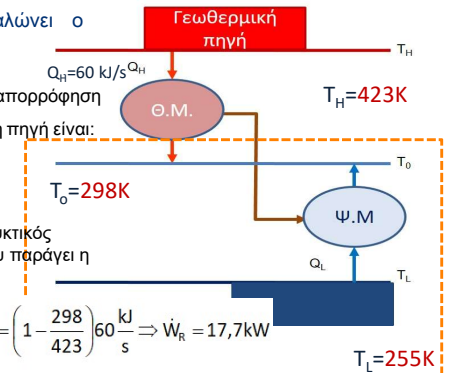
(β) η ισχύς που καταναλώνει ο ψυκτικός κύκλος,

Η ισχύς που παράγεται με απορρόφηση θερμότητας από τη γεωθερμική πηγή είναι:

$$\dot{W}_{th} = \eta_{th}^{id} \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H$$

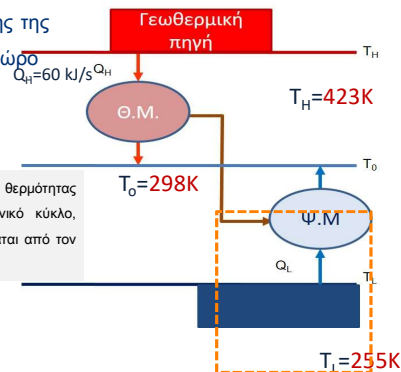
Η ισχύς που καταναλώνει ο ψυκτικός κύκλος ισούται με την ισχύ που παράγει η θερμική μηχανή,

$$\dot{W}_R = \dot{W}_{th} \Rightarrow \dot{W}_R = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{298}{423}\right) 60 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \Rightarrow \dot{W}_R = 17,7 \text{ kW}$$


ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

(γ) ο μέγιστος ρυθμός αφαίρεσης της θερμότητας από τον ψυχόμενο χώρο

Η ισχύς που παράγεται με απορρόφηση θερμότητας από τη γεωθερμική πηγή για τον ιδανικό κύκλο, συνδέεται με τη θερμότητα που απορροφάται από τον ψυχόμενο χώρο με τη σχέση


ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

(γ) ο μέγιστος ρυθμός αφαίρεσης της θερμότητας από τον ψυχόμενο χώρο

$$\frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_R} = \frac{1}{\frac{T_0}{T_L} - 1} \Rightarrow \dot{Q}_L = \left[\frac{1}{\frac{T_0}{T_L} - 1} \right] \dot{W}_R = \left[\frac{1}{\frac{T_0}{T_L} - 1} \right] \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H \Rightarrow \dot{Q}_L = \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H$$

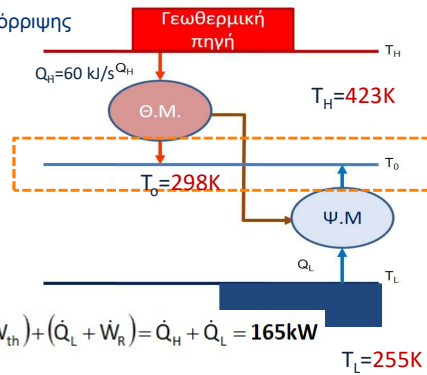
$$\dot{Q}_L = \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(\frac{255}{298 - 255} \right) \left(1 - \frac{298}{423}\right) 60 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \Rightarrow \dot{Q}_L = 105 \text{ kW}$$



ΑΣΚΗΣΗ 7.3:

(δ) ο συνολικός ρυθμός απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον

Ο συνολικός ρυθμός απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον είναι αυτός που προέρχεται από τη θερμική μηχανή και αυτός από το ψυγείο:



$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{Q}_{L,\text{th}} + \dot{Q}_{H,R} = (\dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{th}}) + (\dot{Q}_L + \dot{W}_R) = \dot{Q}_H + \dot{Q}_L = 165\text{kW}$$

$T_L = 255\text{K}$