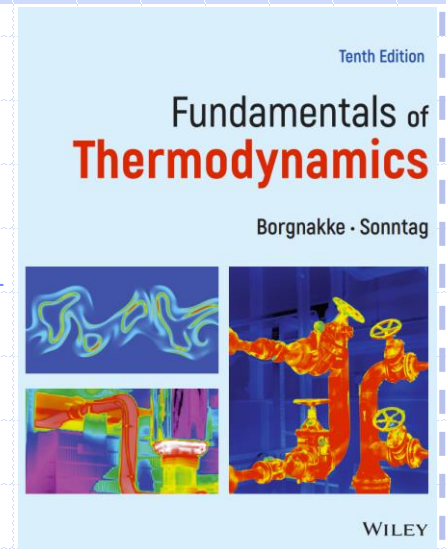




Fundamentals of Thermodynamics
Borgnakke – Sonntag
10^η έκδοση
Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023



Θερμοδυναμική Ι

Συνοπτικοί πίνακες διεργασιών

καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- ❑ **Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή-διεργασία**
- ❑ **Ισόθλιπτη ή ισοβαρής μεταβολή-διεργασία**
- ❑ **Ισόχωρη ή ισόογκη μεταβολή-διεργασία**
- ❑ **Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία**
- ❑ **Πολυτροπική μεταβολή-διεργασία**
- ❑ **Κυκλική μεταβολή**



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

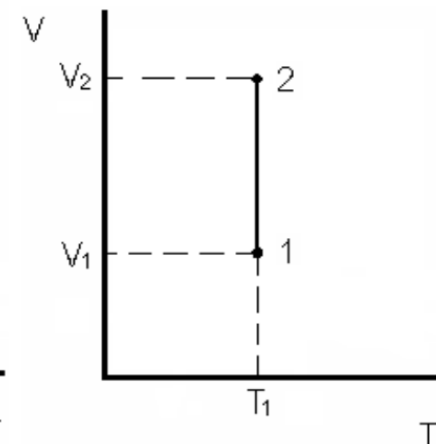
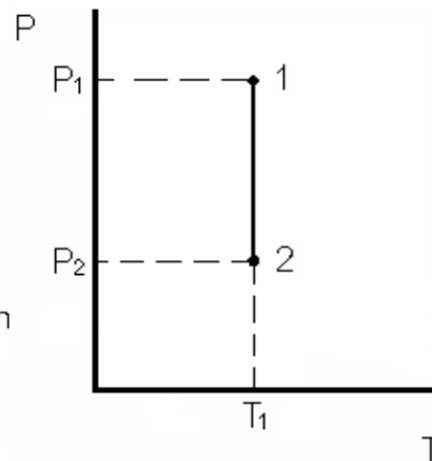
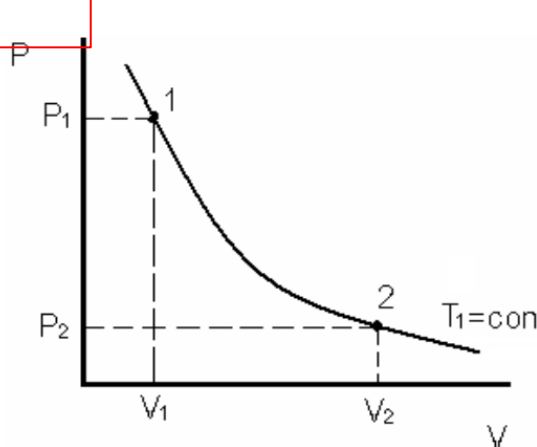
□ Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή-διεργασία

Ισοθερμοκρασιακή: Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλονται η πίεση και ο όγκος του αερίου

Boyle (1662): Η πίεση ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου σε σταθερή θερμοκρασία, είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου

Εξαρτάται από την θερμοκρασία T και τον αριθμό των moles $c = nRT$

$$(P)_{n,T} = \frac{c}{V} \Rightarrow (PV)_{n,T} = c = \text{σταθερή}$$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

Δ.1 Ισόθερμη Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$T_1=T_2=T$	$T_1=T_2=T$
Νόμος ισόθερμης (Νόμος Boyle)	$P_1v_1 = P_2v_2$	$P_1V_1 = P_2V_2$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^1=c$	$P_1V_1=nR_uT$ και $P_2V_2=nR_uT$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	1	
Ειδική θερμότητα	∞	
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du=c_vdT=0$	$dU=0$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$W_{12}^b = nR_uT \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$W_{12}^t = -\int_1^2 V dP = nR_u \ln \frac{V_2}{V_1}$
1 ^{ος} θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = w_{12} + du \quad \quad \Rightarrow \quad q_{12} = w_{12}$ $du = 0$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U \quad \quad \Rightarrow \quad Q_{12} = W_{12}$ $\Delta U = 0$
Θερμότητα	$q_{12} = w_{12}$	$Q_{12} = W_{12}$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_pdT=0$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = R \ln \frac{v_2}{v_1}$	$dS = nR_u \ln \frac{V_2}{V_1} = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

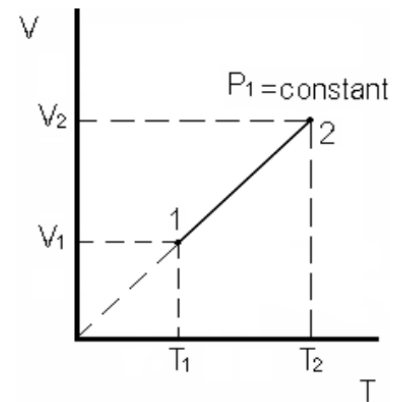
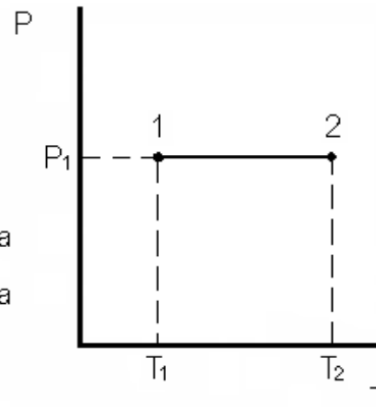
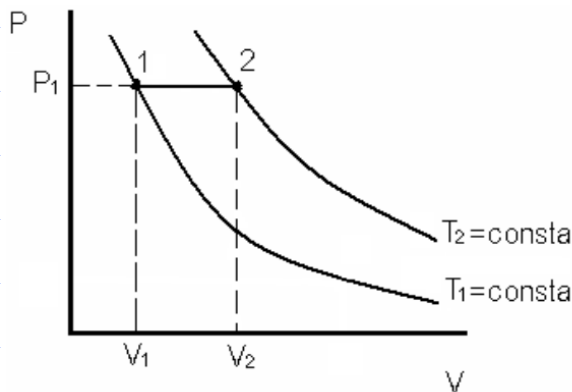
□ Ισοβαρής μεταβολή-διεργασία

Ισοβαρής ή ισόθλιπτη: Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία η πίεση παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλονται η θερμοκρασία και ο όγκος του αερίου

Gay-Lussac (1802): Ο όγκος ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου σε σταθερή πίεση, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας

Εξαρτάται από την θερμοκρασία T και τον αριθμό των moles

$$(V)_{n,P} = cT \Rightarrow \left(\frac{V}{T}\right)_{n,P} = c \quad c = \frac{nR}{T} \Rightarrow \frac{V}{T} = \frac{nR}{P}$$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

Δ.2 Ισοβαρής Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$P_1=P_2=P$	$P_1=P_2=P$
Νόμος ισοβαρούς (Νόμος <i>Gay-Lussac</i>)	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Καταστατική εξίσωση	$PV^0=c$	$PV_1=nR_uT, PV_2=nR_uT_2$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	0	
Ειδική θερμότητα	c_p	C_p
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_vdT$	$dU = nC_vdT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = P_1(v_2 - v_1)$	$W_{12}^b = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = 0$	$W_{12}^t = -\int_1^2 V dP = 0$
1 ^{ος} θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = w_{12} + du$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U$
Θερμότητα	$q_{12} = c_p dT$	$Q_{12} = nC_p dT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = nC_p \ln \frac{T_2}{T_1}$



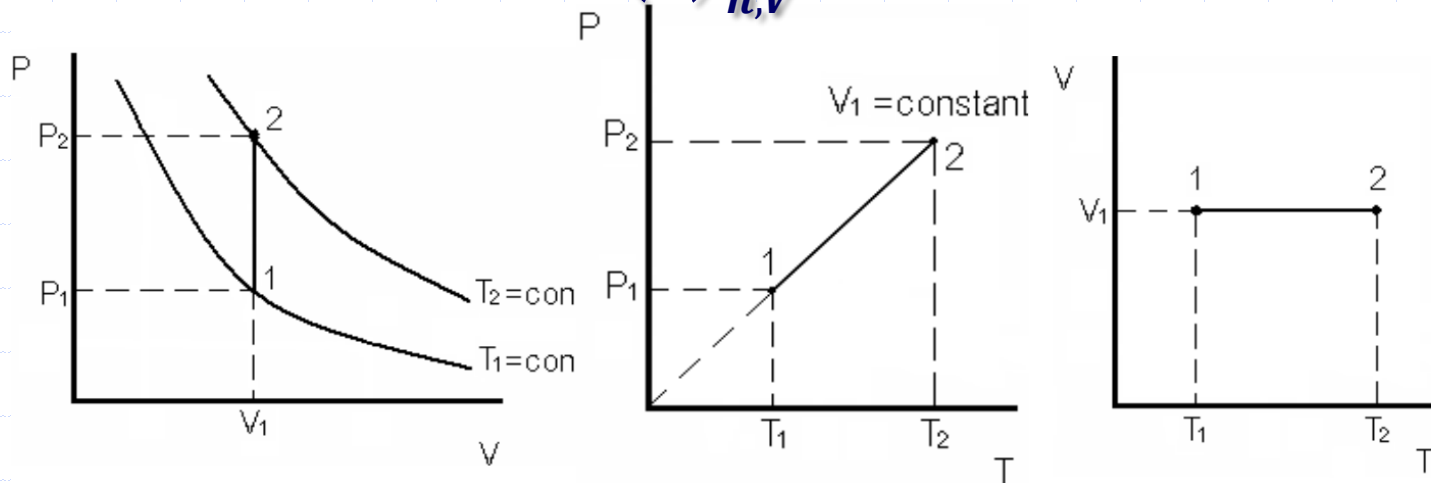
Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

□ Ισόχωρη μεταβολή-διεργασία

Ισόχωρη ή ισόογκη: Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία ο όγκος παραμένει σταθερός, ενώ μεταβάλλονται η θερμοκρασία και η πίεση του αερίου

Charles (1772): Η πίεση ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου υπό σταθερό όγκο, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας

$$(P)_{n,V} = cT \Rightarrow \left(\frac{P}{T}\right)_{n,V} = c \quad c = \frac{nR}{V} \Rightarrow \frac{P}{T} = \frac{nR}{V}$$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

Δ.3 Ισόχωρη Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$v_1=v_2=v$	$V_1=V_2=V$
Νόμος ισόχωρης (Νόμος <i>Charles</i>)	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^\alpha = c$	$P_1V=nR_uT_1$ και $P_2V=nR_uT_2$
Πολυτροπικός εκθέτης, n	∞	
Ειδική θερμότητα	c_v	C_v
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du=c_vdT$	$dU=nC_vdT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 Pdv = 0$	$W_{12}^b = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = v(P_2 - P_1)$	$w_{12}^t = -\int_1^2 V dP = V(P_2 - P_1)$
1 ^{ος} θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12} \mid \Rightarrow q_{12} = du$ $w_{12}=0$	$Q_{12}=W_{12}+\Delta U \mid \Rightarrow Q_{12}=\Delta U$ $W_{12}=0$
Θερμότητα	$q_{12} = c_vdT$	$Q_{12} = nC_vdT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_pdT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = nC_v \ln \frac{T_2}{T_1}$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

□ Αδιαβατική ή Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία

Αδιαβατική ή ισεντροπική: Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία δεν συμβαίνει οποιαδήποτε ανταλλαγή θερμότητας του αερίου (σύστημα) με το περιβάλλον

Poisson: Για μια ορισμένη μάζας ιδανικού αερίου σε μια αδιαβατική μεταβολή ($Q = 0$) ισχύει:

$$PV^k = c \quad \text{όπου} \quad k = \frac{C_P}{C_V}$$

Επομένως, όταν μια ποσότητα μεταβάλλεται αδιαβατικά $1 \rightarrow 2$, ισχύει:

$$\begin{array}{l} P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \\ PV = nRT \end{array} \quad \left| \quad \Rightarrow \frac{nRT_1}{V_1} V_1^k = \frac{nRT_2}{P_2} V_2^k \Rightarrow T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \right.$$

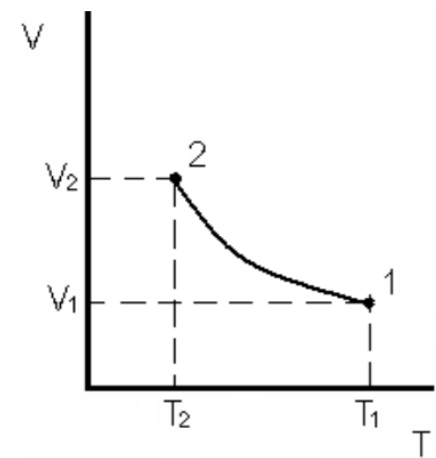
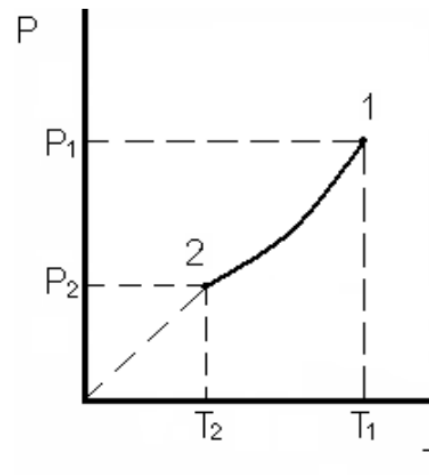
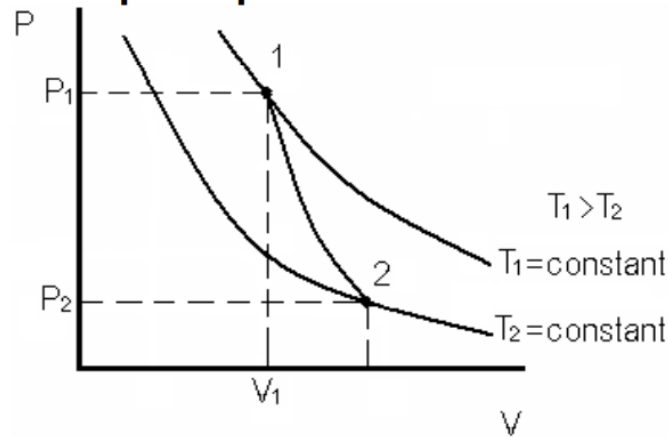
$$\Rightarrow P_1 \left(\frac{nRT_1}{P_1} \right)^k = P_2 \left(\frac{nRT_2}{P_2} \right)^k \Rightarrow P_1^{k-1} T_1^k = P_2^{k-1} T_2^k$$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

□ Αδιαβατική ή Ισεντροπική μεταβολή-διεργασία

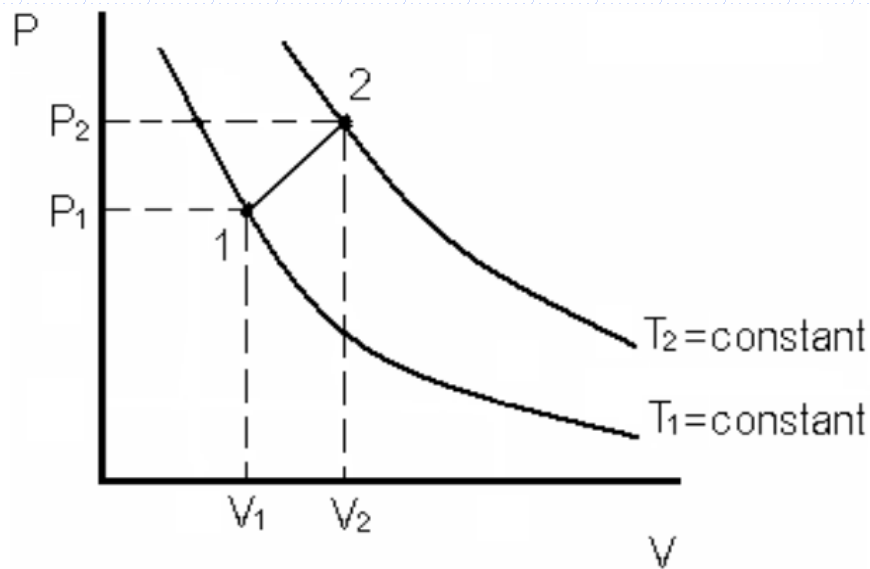
Αδιαβατική :



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

□ Τυχαία μεταβολή

Τυχαία: Η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, κατά την οποία δεν παραμένει σταθερό, κανένα από τα μεγέθη P , V και T , αλλά και επίσης $Q \neq 0$



$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$PV = nRT \Rightarrow \frac{PV}{T} = nR = c$$



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

Δ.4 Ισεντροπική (=Αδιαβατική + Αντιστρεπτή) Μεταβολή-Διεργασία

Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$q_{12} = 0$	$Q_{12} = 0$
Νόμος αδιαβατικής	$P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma$ $T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$ $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$	$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$ $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$
Καταστατική εξίσωση	$Pv^\gamma = c, \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$	$P_1 V_1 = nR_u T_1$ $P_2 V_2 = nR_u T_2$ $\Rightarrow \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$
Πολυτροπικός εκθέτης, n	γ	
Ειδική θερμότητα	0	0
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_v dT$	$dU = nC_v dT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12}^b = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-\gamma}$	$W_{12} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma}$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = \gamma \left(\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-\gamma} \right)$	$w_{12}^t = -\int_1^2 V dP = \gamma \left(\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma} \right)$
1 ^{ος} θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12} \mid \Rightarrow w_{12} = -du$ $q_{12} = 0$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U \mid \Rightarrow W_{12} = -\Delta U$ $Q_{12} = 0$
Θερμότητα	$q_{12} = 0$	$Q_{12} = 0$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = 0$	$dS = 0$



Κύκλος Carnot...

□ Πολυτροπική μεταβολή-διεργασία

Πολυτροπική: Η μεταβολή εισάγεται για να περιγράψει μεταβολές που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ισόθερμη, ισοβαρής ή ισόχωρη, αλλά ούτε και τυχαία. Διέπεται από την σχέση:

Πολυτροπικός
εκθέτης

$$PV^n = c$$

Αποτελεί γενίκευση των νόμων που διέπουν τις προαναφερθείσες μεταβολές



Κύκλος Carnot...

Δ.5 Πολυτροπική Μεταβολή-Διεργασία

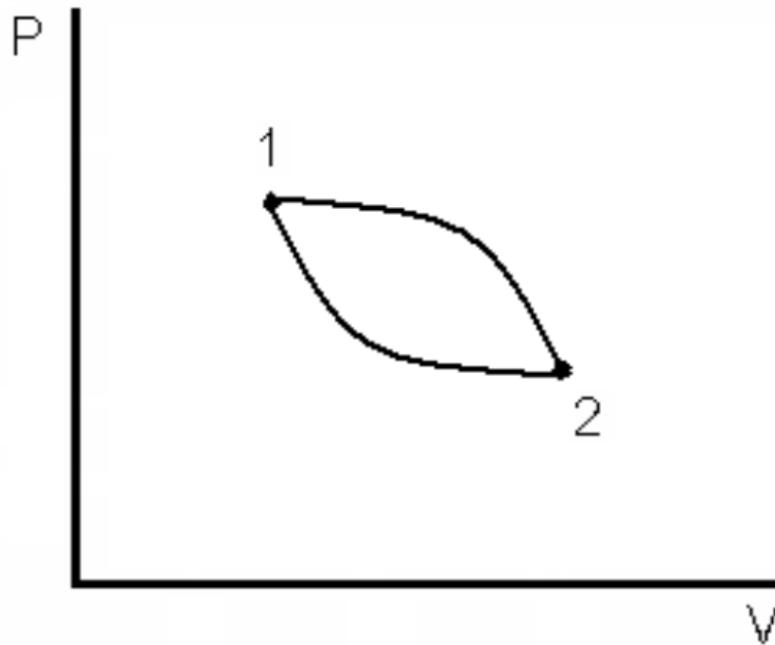
Ιδιότητες -Μεγέθη	Ειδικά μεγέθη	Κανονικά μεγέθη
Συνθήκη	$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$	$PV^n=c$
Νόμος πολυτροπικής	$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$	
Καταστατική εξίσωση	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$	$P_1 V_1 = nR_u T_1$ $P_2 V_2 = nR_u T_2$ $\Rightarrow \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$
Πολυτροπικός εκθέτης (n)	n=γ αδιαβατική, n=0 ισοβαρής n=1 ισόθερμη n=∞ ισόχωρη	
Ειδική θερμότητα	$c_n = c_v \left(\frac{n-\gamma}{n-1}\right)$	
Μεταβολή εσωτερικής ενέργειας	$du = c_v dT$	$dU = nC_v dT$
Μηχανικό έργο (ογκομεταβολής)	$w_{12} = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{n-1}$	$W_{12} = P(V_2 - V_1)$
Τεχνικό έργο	$w_{12}^t = -\int_1^2 v dP = n \left(\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{n-1}\right)$	
1ος θερμοδυναμικός νόμος	$q_{12} = du - w_{12}$	$Q_{12} = W_{12} + \Delta U$
Θερμότητα	$q_{12} = c_n dT$	$Q_{12} = nC_n dT$
Μεταβολή ενθαλπίας	$dh = c_p dT$	
Μεταβολή εντροπίας	$ds = \int_1^2 \frac{dq_{12}}{T} = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$	$dS = -nC_n \ln \frac{T_2}{T_1}$



Κύκλος Carnot...

□ Κυκλική μεταβολή

Κυκλική: Μια συνεχής, κλειστή μεταβολή, που αποτελείται από τυχαίες ή όχι μεταβολές, στην οποία ταυτίζονται η αρχική και τελική κατάσταση



Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

