

Cuvânt înainte

Acest curs este destinat studenților care se specializează în profilul de „Inginerie economică industrială” al Facultății de Inginerie Managerială și a Mediului, care funcționează în cadrul Universității Ecologice din București. Prin predarea acestui curs, se dorește înțelegerea funcționării mașinilor mecano-energetice pe baza cunoștințelor minimale de termodinamică predate în prima parte și a noțiunilor de mecanica fluidelor predate anterior. La aceste discipline se adaugă cunoștințe de mecanică, rezistența materialelor și de chimia reacțiilor de ardere. Învățarea acestui tip de utilaje este în deplin consens cu profilul de Universitate Ecologică prin folosirea energiilor alternative și regenerabile în producerea energiei electrice și termice. Cursul conține aplicații pentru proiect și seminar.

Introducere

Mașina este o creație artificială omenească, compusă din corpuri materiale care au o mișcare bine determinată, ciclică, destinată transformării energiei în scop util. Componentele mașinii se mișcă relativ unele față de altele, creând volume (spații libere) variabile între componente prin care circulă fluidul. Mișcarea subansamblelor mașinii este dată de motorul electric, în cazul transformării energiei electrice în energie mecanică, sau de un fluid motor care cedează energia termică unui rotor, purtător de energie mecanică, energie care mai departe poate fi convertită în energie electrică prin fenomenul de inducție electromagnetică.

După cum s-a arătat, **mașinile mecano-energetice** transformă energia primită în energie mecanică, iar energia mecanică este convertită mai departe în altă formă de energie. Mașinile mecano-energetice pot fi generatoare de energie electrică (turbine) sau consumatoare de energie electrică (mașini). Indiferent dacă mașinile mecano-energetice sunt generatoare sau consumatoare de energie electrică, acestea transformă energia primită în alte forme de energie cu un anumit randament.

Analiza modului de transformare a energiei termice în energie mecanică (mașini termice) și invers a energiei mecanice în energie termică (mașini frigorifice) se face prin **termodinamica** proceselor.

Termodinamica este disciplina științifică care studiază dinamica internă a sistemelor sub efect termic. Abordarea teoretică a termodinamicii se poate face prin metoda fenomenologică (macroscopică) care consideră proprietățile generale, de ansamblu, ale sistemelor fizice formate dintr-un număr finit de corpuri. În abordarea fenomenologică se pornește de la analiza proceselor macroscopice din natură. Altă modalitate de studiu a termodinamicii este prin *metoda statistică* (microscopică) care consideră structura

moleculară a corpurilor. În abordarea statistică se pornește de la un număr foarte mare de particule elementare care formează ansamblul sistemului fizic studiat. Aceste particule se află în interacțiune datorită stării lor de mobilitate.

Transformările energetice ale fluidului din mașinile mecano-energetice sunt completate de **curgerea fluidelor** prin spațiile dintre piesele mașinii în mișcare. Curgerea fluidelor în mașini se caracterizează prin *lungimi mici de curgere*. Pierderile de sarcină distribuite (pierderile de presiune prin frecare) sunt mici în raport cu pierderile locale de presiune cauzate de obstacole hidraulice. Acestea provoacă schimbări de geometria curgerii (de la diametre mari la diametre mici sau invers, piesele mecanice care se interpun în curgerea fluidului care le unge, schimbări bruște de direcție, obturații controlate).

Un rol important în proiectarea mașinilor mecano-energetice îl are disponerea **pieselor în mișcare** ale mașinii. Se caută forma cea mai avantajoasă, modul de sprijinire sau de prindere cel mai avantajos. Criteriile de proiectare sunt legate de uniformitatea eforturilor în material (corpuri de egală rezistență) și a minimizării (până la anulare) a momentului rezultat.

Metodele de producere a energiei cu maximă eficiență sunt în permanent studiu. Se produce energie prin intermediul turbinelor: de abur (transformă energia termică a aburului), de gaze (recuperarea energiei de la ardere), hidraulice (în hidrocentrale de diverse dimensiuni), eoliene (energie neconvențională). O categorie aparte o reprezintă captatoarele pentru producerea energiei solare.

Mărimi fizice și unități de măsură utilizate în termodinamică

Mărimile fizice fundamentale utilizate în termodinamică sunt cele de natură mecanică, lungimea, L , masa, M și timpul, τ , la care se adaugă mărimea fundamentală specifică proceselor calorice, temperatura, T .

Unitatea de măsură fundamentală pentru temperatură este gradul Kelvin, simbolizat cu K , în sistemul internațional de măsură. Unitatea de măsură fundamentală este folosită pentru exprimarea temperaturii în scara absolută de temperatură. Temperatura exprimată în grade Kelvin exprimă starea de agitație termică a unui sistem termodinamic și nu poate fi decât pozitivă. Limita de zero Kelvin este limita la care oricare mișcare internă a sistemului încetează și este o limită teoretică.

Unitatea tolerată în sistemul tehnic de măsură este gradul Celsius, simbolizat cu $^{\circ}C$, folosit pentru exprimarea temperaturilor uzuale.

Relația între temperatura în grade Kelvin și temperatura în °C:

$$T(K) = 273,15 + T(^{\circ}C) \quad (1)$$

Unitatea tolerată în sistemul englezesc de măsură a temperaturii pe scara absolută este gradul Rankin, simbolizat cu *R*. Relația între cele două scări absolute de temperatură este:

$$T(R) = 1,8 \cdot T(K) \quad (2)$$

Unitatea tolerată în sistemul englezesc de măsură a temperaturii pe scara relativă este gradul Fahrenheit, simbolizat cu °F. Relația între gradul Fahrenheit și gradul Celsius este:

$$T(^{\circ}F) = 32 + 1,8 \cdot T(^{\circ}C) \quad (3)$$

Relația de transformare inversă din grade Celsius în grade Fahrenheit este:

$$T(^{\circ}C) = \frac{T(^{\circ}F) - 32}{1,8} \quad (4)$$

Exemplu de transformare:

La 0°C corespund 32°F și la 100°C corespund 212°F, conform relației (3).

La 0°F corespund -17,8°C, iar la 100°F corespund 37,8°C conform relației (4). Se poate deduce din aceste transformări că scara de temperatură Fahrenheit a fost concepută de la 0°F la 100°F pentru a caracteriza gama normală de temperaturi exterioare pentru existența umană.

Scara de temperatură Fahrenheit este utilizată curent în Statele Unite ale Americii pentru scopuri non științifice, cum ar fi pentru toate termometrele stradale.

Mărimile fizice derivate folosite în termodinamică și transfer de energie termică sunt prezentate în Tabel 1.

Denumire, simbol	Relație de definiție	Unități de măsură în SI	Unități de măsură în sistemul tehnic	Unități de măsură în sistemul englezesc
Energia, <i>Q</i>	$Q = L + \Delta E$ (primul principiu al termodinamicii)	J	1Kcal = 4186J 1kJ = 1000J	1Btu = 0,252Kcal = 1,055kJ = 1055J

<p>Puterea, P</p>	$P = \frac{Q}{\tau}$ <p>τ – timpul de transmitere</p>	$1W = \frac{1J}{1s}$	$1kW = 1000W$	$1 \frac{Btu}{sec} = 1,055kW$ $= 1055W$
<p>Căldură specifică, c_p (la presiune constantă)</p>	$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ <p>(Relația calorimetrică)</p> <p>sau</p> $P = Q_m \cdot c_p \cdot \Delta T$	$\langle c_p \rangle = \frac{\langle Q \rangle}{\langle m \rangle \cdot \langle \Delta T \rangle}$ $= \frac{J}{kg \cdot K}$	<p>Căldura specifică a apei la presiune și temperatură ambiantă este:</p> $1 \frac{Kcal}{kg \cdot ^\circ C} =$ $4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} =$ $4186 \frac{J}{kg \cdot K}$	<p>Căldura specifică a apei la presiune și temperatură ambiantă este: $1 \frac{Btu}{lb \cdot ^\circ F} =$</p> $\frac{0,252Kcal}{0,45359kg \cdot \frac{1}{1,8} ^\circ C} = 1 \frac{Kcal}{kg \cdot ^\circ C}$
<p>Conductivitate termică, λ (se referă la căldura transmisă din aproape în aproape)</p>	$P = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T$ <p>sau</p> $Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T \cdot \tau$ <p>A: aria de transmitere</p> <p>δ: grosimea prin care se transmite</p> <p>ΔT: gradientul de temperatură responsabil de transmisia căldurii (conform principiului zero al termodinamicii)</p>	$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle P \rangle}{\langle A \rangle \frac{1}{\langle \delta \rangle} \langle \Delta T \rangle}$ $= \frac{W}{m^2 \cdot \frac{1}{m} \cdot K}$ $= \frac{W}{m \cdot K}$ $= \frac{J}{m \cdot K \cdot s}$	$1 \frac{Kcal}{m \cdot ^\circ C \cdot h} =$ $= \frac{4186J}{m \cdot ^\circ C \cdot 3600s}$ $= 1,163 \frac{W}{m \cdot K}$	$1 \frac{Btu}{ft \cdot ^\circ F \cdot hr} =$ $= \frac{0,252Kcal}{0,3048m \cdot \frac{1}{1,8} ^\circ C \cdot hr}$ $= 1,488 \frac{Kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C}$ $= 1,73 \frac{W}{m \cdot K}$

Coeficient de transfer termic în fluide, α (se referă la căldura transmisă prin mișcarea fluidului)	$P = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$	$\langle \alpha \rangle$ $= \frac{\langle P \rangle}{\langle A \rangle \cdot \langle \Delta T \rangle}$ $= \frac{W}{m^2 \cdot K}$ $= \frac{J}{m^2 \cdot K \cdot s}$	$1 \frac{Kcal}{m^2 \cdot ^\circ C \cdot h}$ $= \frac{4186J}{m^2 \cdot ^\circ C \cdot 3600s}$ $= 1,163 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$1 \frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F \cdot hr}$ $= \frac{0,252Kcal}{0,3048^2 m^2 \cdot \frac{1}{1,8} ^\circ C \cdot h}$ $= 4,883 \frac{Kcal}{m^2 \cdot ^\circ C \cdot h}$ $= 5,68 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
---	-------------------------------------	--	--	--

Tabel 1. Mărimi fizice folosite în termodinamică și unități de măsură.

Bazele termodinamicii

Termodinamica studiază *dinamica* sistemelor din punct de vedere a elementelor componente ale acestora aflate într-o permanentă interacțiune ca urmare a energiei *termice* individuale.

Sistem termodinamic

Sistemul este un ansamblu de elemente care sunt legate printr-o apartenență comună, fiind supuse unor condiții și legi de existență și între care există interacțiuni interne permanente, elementele fiind în același timp în interacțiune cu mediul, aflat în afara sistemului.

Sistemul termodinamic se definește ca o cantitate de materie, delimitată în spațiu cu frontiere fixe sau mobile, formată dintr-un număr foarte mare de particule, aflate în anumite condiții (parametri de stare) și între care au loc interacțiuni fizice sau chimice sub efect termic. Sistemul termodinamic este studiat în raport cu interacțiunile de masă și energetice pe care le are cu mediul ambiant.

Sistemul termodinamic este perceput ca o entitate macroscopică, caracterizată prin *parametri de stare* și *parametri de proces*. Parametrii de stare caracterizează macroscopic un sistem, în timp ce parametrii de proces se definesc odată cu modificarea parametrilor de stare ca urmare a unui proces la care este supus sistemul termodinamic datorită modificării parametrilor externi, de mediu.

Din punct de vedere al schimbului de **substanță** cu mediul exterior, se clasifică în sisteme termodinamice *deschise* și sisteme termodinamice *închise*. În sistemele termodinamice deschise schimbul de *materie* cu mediul are loc la granița sistemului. Granița sistemului reprezintă o suprafață oricât de complexă care delimitează volumul sistemului. Suprafețele de graniță ale sistemului termodinamic pot fi materiale fizice (incinta unui motor) sau reprezintă o delimitare convențională (evacuarea în atmosferă).

Sistemele termodinamice închise au granița impenetrabilă la materie și conțin întotdeauna aceeași masă (conform legii conservării masei). Volumul sistemului poate varia, deoarece suprafețele de graniță pot avea anumite libertăți de mișcare, masa rămânând constantă.

Din punct de vedere al schimbului de **energie termică** cu mediul înconjurător, sistemele termodinamice pot fi *adiabate* (fără schimb de energie termică) sau cu schimb de energie termică (caz în care se clasifică și în funcție de alte criterii).

Mărimi termodinamice de stare

Starea calitativă (stare de agregare, aspect) și cantitativă (temperatură, presiune, energie) a unui sistem termodinamic poate fi caracterizată fizic prin valoarea parametrilor de stare ai sistemului respectiv. Valorile acestor parametri pot caracteriza univoc (cu precizie, incontestabil) sau probabilistic (prin valori estimate și interpretarea acestora) starea sistemului studiat.

Parametrii **externi** depind de energia și poziția corpurilor înconjurătoare (presiunea și temperatura exterioară) și au influență asupra oricăror sisteme termodinamice cu condiția să nu fie concomitent *adiabate* (fără schimb de energie termică), *închise* (fără schimb de materie) și *rigide* (fără schimb de energie mecanică). Parametrii de stare caracterizează intrinsec sistemul termodinamic studiat și se supun variațiilor parametrilor externi prin schimbul de materie și energie cu mediul.

Parametrii de stare care caracterizează sistemul termodinamic independent de masa acestuia se numesc *parametrii de stare intensivi* (temperatură, presiune, concentrație). Parametrii de stare a căror valoare depinde și de masa sistemului se numesc *parametrii de stare extensivi* (volum, masă, energie).

Sistemul se află în **echilibru termodinamic** atunci când toți parametrii de stare ai acestuia sunt constanți în timp. Trecerea sistemului de la o stare de echilibru la altă stare de echilibru termodinamic se face prin variația a cel puțin unuia dintre parametrii de stare. Valoarea unui parametru de stare la echilibru termodinamic poate depinde de condițiile de echilibru (valoarea constantă a parametrilor externi) și de valoarea celorlalți parametri de stare interni cu care se află în interdependență în funcție de numărul de **grade de libertate** ale sistemului.

Pentru un sistem termodinamic, numărul de grade de libertate, N , se calculează cu relația

$$N = C - L + 2 \quad (5)$$

C este numărul de componente

L este numărul de legături în sistem

Exemplu nr. 1: Aerul închis într-o incintă de volum variabil (graniță variabilă) are 2 grade de libertate. Numărul de componente este 1 (aerul). Numărul de legături este 1 (ecuația gazelor reale sau ecuația gazelor perfecte). Parametrii interni ai acestui sistem termodinamic sunt: temperatura, presiunea și volumul aerului. Dintre acești trei parametri numai doi pot evolua independent și al treilea parametru rezultă în funcție de cei doi parametri independenți. Al treilea parametru se calculează utilizând ecuația gazelor.

Exemplu nr. 2: Apa dintr-un rezervor închis are 2 grade de libertate. Numărul de componente este 1 (apa). Numărul de legături este 1 (relația de variație a volumului apei în funcție de temperatură, adică relația de dilatație). Parametrii interni ai acestui sistem termodinamic sunt aceiași: presiunea, volumul și temperatura. Presiunea în masa lichidului variază practic independent de volum și temperatură. Suprapresiunea de la suprafața lichidului se transmite în toată masa acestuia conform principiului lui Pascal (a se vedea cursul de Mecanica fluidelor). Variația volumului de apă poate fi importantă în instalațiile de încălzire, de aceea în aceste instalații se prevăd vase tampon numite vase de expansiune care să preia volumul de dilatare a apei.

La trecerea sistemului de la o stare de echilibru inițială către altă stare de echilibru termodinamic finală are loc variația parametrilor de stare între valorile corespunzătoare celor două stări de echilibru termodinamic. Valorile parametrilor de stare corespunzătoare stării de echilibru finale nu depind decât de natura echilibrului în starea finală și nu depind de evoluția sistemului termodinamic între starea inițială și starea finală, adică nu depind de valorile intermediare de tranziție între starea inițială și starea finală.

Din motivul că parametrii de stare au valori constante la echilibru, aceștia pot fi direct măsurabili (presiunea, temperatura, masa, volumul, densitatea) sau calculabili (energia, densitatea) din mărimile direct măsurabile.

Starea de **echilibru termodinamic extern** definește egalitatea nivelului mediu de energie corespunzătoare atât sistemului cât și mediului înconjurător. În această situație, atât sistemul termodinamic cât și mediul sunt în echilibru.

Mărimi termodinamice de proces

O modificare a stării sistemului este denumită **proces termodinamic** (asociat unei modificări sau transformări de stare), iar drumul pe care îl parcurge sistemul de la starea inițială la starea finală este descris de o succesiune de stări intermediare prin care sistemul trece. În evoluția sistemului, trebuie să existe o variație pentru cel puțin un parametru de stare.

În timpul unui proces termodinamic apare modificarea stării sistemului, această transformare fiind însoțită de schimb de energie sub formă de căldură și de lucru mecanic în raport cu mediul exterior cu care sistemul interacționează. Spre deosebire de mărimile de stare, care erau direct măsurabile sau calculabile din măsurători directe, **mărimile termodinamice de proces** reflectă drumul parcurs de sistemul termodinamic între starea inițială și starea finală. Fiind mărimi termodinamice de proces, ele nu corespund vreunei stări ale sistemului ci sunt asociate numai cu fenomene de tranziție a sistemului, cu drumul parcurs de acesta.

Cele mai cunoscute mărimi termodinamice de proces sunt *lucrul mecanic și căldura*. Ambele mărimi sunt cantități de *tranzit* între sisteme sau între sistem și mediu și nu caracterizează starea unui sistem, precum mărimile de stare, ci reflectă procesul termodinamic realizat. Mărimile termodinamice de proces *depind de drumul parcurs* de sistem în transformarea termodinamică. Pentru determinarea cantitativă a căldurii și a lucrului mecanic schimbat cu mediul, trebuie să se cunoască: tipul transformării reprezentat prin ecuația transformării, parametrii de stare inițiali, parametrii de stare finali și sensul în care decurge transformarea.

Procesul termodinamic reversibil se caracterizează printr-o evoluție repetitivă între două stări, trecând prin *aceleași stări intermediare* indiferent de sensul de evoluție între cele două stări și ori de câte ori s-ar repeta procesul. Condiția pentru ca un proces să fie reversibil este ca în timpul desfășurării acestuia să nu se producă nicio modificare în structura sistemului termodinamic, astfel încât acesta să reacționeze absolut la fel la modificarea unui parametru extern și în același timp să nu producă nicio modificare în mediul ambiant al sistemului.

Ca oricare proces termodinamic, acesta se petrece atunci când starea de echilibru termodinamic (starea inițială) a fost perturbată de acțiunea unor factori externi asupra sistemului sau s-au modificat parametrii de stare externi. Când dinamica sistemului termodinamic este incomparabil mai mare (cu 3-4 ordine de mărime) decât cea a

mediului, atunci sistemul termodinamic are capacitatea de a urmări *instantaneu* evoluția parametrilor externi restabilind *instantaneu* echilibrul termodinamic la oricare modificare oricât de mică a vreunui parametru extern. Dacă modificarea parametrului extern are loc după o anumită traiectorie, atunci sistemul termodinamic va urmări modificarea parametrului extern prin aceleași stări intermediare ori de câte ori ar avea loc procesul, cu alte cuvinte procesul suferit de sistemul termodinamic ar fi repetitiv, adică reversibil. Stările intermediare ale sistemului termodinamic supus unui proces reversibil sunt *stări de echilibru*, succesiunea acestor stări fiind consecința urmării îndeaproape de către sistem a evoluției impuse de factorul extern. Factorul extern poate reprezenta fie modificarea unui parametru extern, fie urmarea unui schimb de energie mecanică sau calorică. Lucrul mecanic și căldura schimbate de sistemul termodinamic cu mediul sunt tot timpul aceleași în cazul unui proces reversibil.

Formele de energie care stau la baza caracterizării proceselor termodinamice sunt de natură termică (căldura) sau mecanică (lucrul mecanic).

Căldura (energia termică) măsoară schimbul de energie dintre corpuri pe baza interacțiunii termice. Ea reprezintă la nivel microscopic o formă dezordonată de transfer de energie, prin ciocnirile și transmiterea impulsului între molecule. Ca și lucrul mecanic, căldura schimbată în decursul unui proces termodinamic depinde de evoluția procesului respectiv.

Lucrul mecanic poate fi **de deplasare** pentru sisteme termodinamice deschise și **de proces** pentru sisteme termodinamice închise. Când se efectuează lucru mecanic de deplasare are loc curgerea fluidelor din sau spre sistemul termodinamic, cu menținerea presiunii și temperaturii constante, iar volumul sistemului crește sau se micșorează cu volumul de materie schimbat cu mediul înconjurător. Când se efectuează lucru mecanic de proces are loc modificarea presiunii, volumului sau a temperaturii conform ecuației gazelor.

Lucrul mecanic efectuat de un sistem termodinamic fluid între două stări ale sale reprezintă o formă de energie consumată pentru extinderea volumului propriu la o anumită presiune. Pentru o aceeași extindere de volum realizată de fluid sub acțiunea presiunii proprii, considerată constantă, energia consumată de fluid este mai mare cu cât presiunea acestuia este mai mare.

$$L = p \cdot \Delta V \tag{6}$$

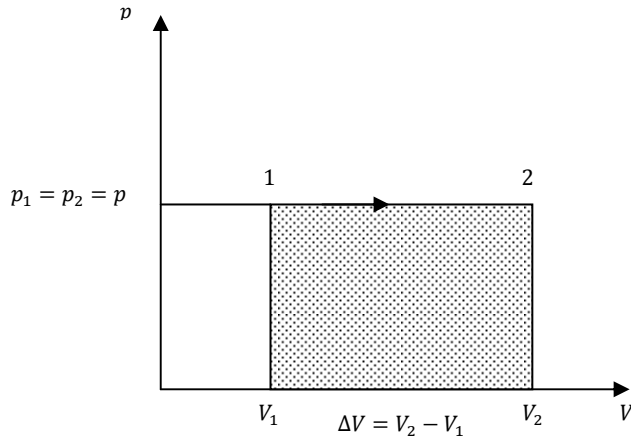


Figura 1. Lucrul mecanic efectuat de un fluid pentru extinderea sa sub presiune constantă
 Pentru extinderea de volum a unui sistem termodinamic sub presiune variabilă (majoritatea situațiilor), procesul poate fi descompus într-o succesiune infinită de procese care au loc la presiune constantă, lucrul mecanic reprezentând grafic aria de sub curba procesului termodinamic. Se observă că lucrul mecanic (aria de sub curbă) depinde de drumul parcurs de sistemul termodinamic (forma curbei dintre cele două stări). Schimbarea sensului procesului termodinamic schimbă matematic semnul algebric al energiei sub formă de lucru mecanic, iar fizic schimbă natura **lucrului mecanic** de la **efectuat de fluid** la **efectuat asupra fluidului**.

$$L = \int_1^2 p \cdot dV \quad (7)$$

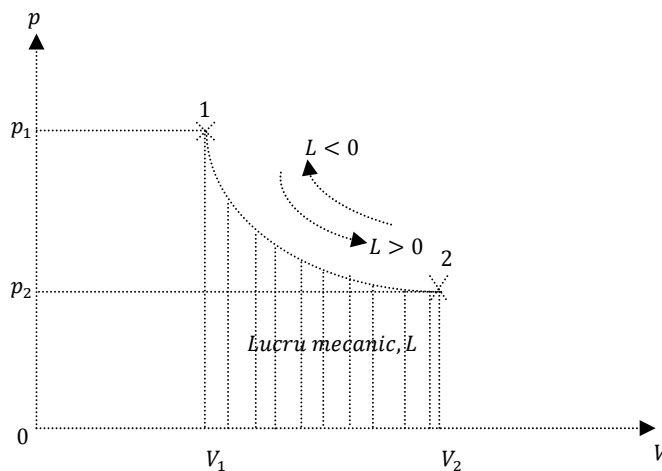


Figura 2. Lucrul mecanic efectuat de un sistem termodinamic