

# REDUCEREA IREVERSIBILITĂȚII PROCESELOR ÎN CUPTORUL DE COACERE A PÂINII

Corina CHELMENCIUC, Valentin MUSTEAȚĂ, Larisa TCACI

Universitatea Tehnică a Moldovei

**Rezumat:** În lucrarea dată este argumentată necesitatea reducerii ireversibilității proceselor în cuptorul de pâine PPP 3 54. 211 ST utilizat pentru coacerea pâinii la SA "Franzețuța". În special, sunt analizate pierderile de exergie cauzate de ireversibilitatea procesului de amestecare a gazelor de ardere fierbinți din camera de ardere cu gaze reci recirculate pentru asigurarea unei temperaturi necesare pentru coacerea pâinii. Este propusă o soluție de diminuare a ireversibilității procesului de amestecare prin înlocuirea acestuia cu un proces de transfer de căldură, prin înlocuind camera de ardere a cuptorului cu un motor cu ardere internă. Această măsură va reduce pierderile de exergie în cuptor influențând direct eficiența energetică a acestuia.

**Cuvinte cheie:** randament de perfecțiune termodinamică, proces ireversibil, exergie, anergie.

## 1. Generalități

Sporirea eficienței energetice în procesul tehnologic de coacere a pâinii este o preocupare destul de importantă și necesară, ținând cont de faptul că pâinea este practic cel mai solicitat produs alimentar în Republica Moldova. Creșterea continuă a prețului combustibilului organic și impactul negativ al utilizării acestuia de asemenea demonstrează necesitatea raționalizării consumului de energie.

Sunt foarte importante cercetările destinate elaborării unor metode și scheme optime de utilizare a combustibilului organic în procesele tehnologice industriale.

În termodinamică ca indice general al calității diverselor forme de energie de mult timp se utilizează noțiunea de capacitate de a produce lucrul mecanic. Ca indice al calității diverselor forme de energie se utilizează cantitatea maximă a lucrului mecanic, care poate fi produsă de un flux de agent termic în transformările reversibile, ce evoluează până la obținerea echilibrului cu mediul ambiant. Această parte a energiei a fost denumită exergie, iar metoda care tratează această noțiune este metoda exergetică [1].

Analiza exergetică este un instrument foarte convenabil de studiere a diverselor sisteme tehnice și procese tehnologice. Bilanțul exergetic al acestor sisteme dă posibilitatea de a aprecia corect nivelul de consum al resurselor energetice în procesul tehnologic dat, de a efectua analiza cantitativă a pierderilor de energie și de a elabora căi de reducere a acestora sau de a le recupera.

În cuptoarele de panificație are loc un proces de coacere a pâinii. Este important de înțeles cât de eficient este acest proces din punct de vedere energetic. Analiza proceselor termice pe baza teoriei clasice a ciclurilor (în deosebi a randamentului termic și bilanțului energetic) nu permite să se țină seama de toți factorii determinanți: starea sistemului, forma energiei consumate, gradul de perfecțiune a proceselor (ireversibilitatea acestora), starea mediului ambiant. Aceasta duce la dificultatea interpretării rezultatelor obținute. Nu întotdeauna numai pe baza bilanțului energetic este posibilă determinarea mecanismului fizic și valoarea scurgerilor de energie.

În scopul elaborării unei metode de analiză și calcul, care să permită luarea în calcul, în egală măsură, a tuturor factorilor determinanți, s-au introdus noțiunile de exergie și anergie.

Exergia este cantitatea maximă de energie care, pentru o stare dată a mediului ambiant, în condiții de reversibilitate totală a proceselor, se poate transforma în oricare altă formă de energie.

Anergia este energia care, chiar în condiții de reversibilitate totală a proceselor, nu se poate transforma în alte forme de energie.

Operând cu aceste mărimi, se ține cont de toți factorii care determină condițiile de transformare a energiei. Astfel, rezultatele obținute sunt în totală concordanță cu principiile termodinamicii, respectându-se atât caracterul conservativ al energiei, cât și caracterul restrictiv referitor la sensul și limita posibilă a transformărilor de energie.

Valoarea de utilizare (valoarea economică a energiei) este cu atât mai ridicată, cu cât exergia corespunzătoare este mai mare. Din acest considerent, exergia poate fi utilizată ca o mărime de evaluare în procesele energetice, atât în ceea ce privește energiile vehiculate, cât și calitatea proceselor.

## 2. Bilanțul exergetic al cuptorului

Cuptoarele sunt destinate pentru producerea anumitor produse utile pentru viața umană. Aceste produse nu posedă valoare energetică (în cazul dat produse de panificație). În cadrul procesului tehnologic din cuptor, materia primă (aluatul), care la fel nu posedă valoare energetică, este supusă unor transformări fizice și chimice. De asemenea, în cuptor este introdus combustibil, energia chimică a căruia asigură petrecerea transformărilor menționate. Pe lângă cele menționate, în cuptor mai sunt introduse aer necesar arderii combustibilului și abur pentru formarea cojii pâinii.

Componentele evacuate din cuptor reprezintă produsul finit (pâinea coaptă) și gaze de ardere evacuate în mediul ambiant prin coșul de fum.

În concordanță cu principiul al doilea al termodinamicii suma fluxurilor de energie la intrare în cuptor este egală cu suma fluxurilor de exergie la ieșire din cuptor plus pierderile de exergie. În fig 1 este prezentată schema fluxurilor de exergie la intrare și la ieșire din cuptor.

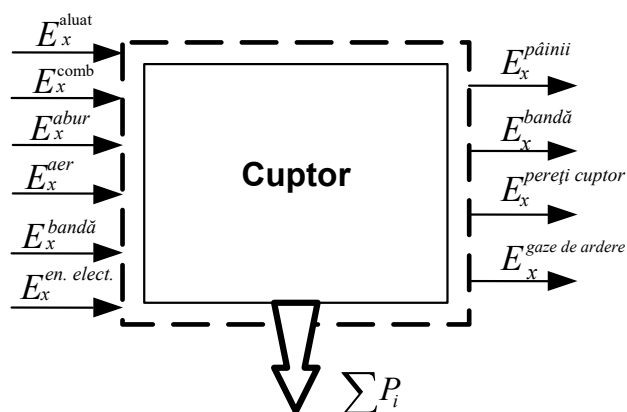


Fig. 1. Fluxurile exergetice în cuptor

Perfecțiunea termodinamică a cuptorului se caracterizează prin randamentul de perfecțiune termodinamică al acestei instalații  $\gamma_{ex}^{cupt}$  și reprezintă raportul dintre suma fluxurilor de exergie la ieșire din

instalație  $\sum_{i=1}^n E_{xi}^e$  și suma fluxurilor de exergie la intrare în instalație  $\sum_{i=1}^n E_{xi}^i$ :

$$\gamma_{ex}^{cupt} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{xi}^e}{\sum_{i=1}^n E_{xi}^i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n E_{xi}^i}, \quad (1)$$

în care  $\sum_{i=1}^n P_i$  sunt pierderile de exergie în cuptor.

Iată de ce, cunoașterea și necesitatea de a calcula pierderile de exergie, au o importanță considerabilă pentru determinarea metodelor de reducere a ireversibilității proceselor care au loc în cuptorul studiat.

Pentru calculul pierderilor de exergie vom utiliza metoda entropică, care prevede calculul pierderilor de exergie în fiecare proces separat utilizând teorema Guy-Stodola, [2]:

$$P_{ex} = T_o \cdot \Delta S, \quad (2)$$

unde:  $T_o$  este temperatura termodinamică a mediului ambiant;

$\Delta S$  - creșterea entropiei în procesul examinat din cauza ireversibilității procesului.

Din ultima relație rezultă, că problema calculului în orice proces se reduce la calculul variației de entropie.

### 3. Ireversibilitatea procesului de amestecare a gazelor fierbinți din camera de ardere cu gaze reci recirculate

Deoarece procesele reale din cuptor sunt procese ireversibile, în acestea are loc distrugerea exergiei. Îmbunătățirea proceselor, respectiv reducerea ireversibilității acestora, se poate realiza prin perfecționarea cuptorului în scopul micșorării pierderilor de exergie, ceea ce poate duce la diminuarea cheltuielilor de exploatare (datorită reducerii consumului de energie primară).

Unul dintre cele mai ireversibile procese care decurg în cuptor, reprezintă procesul de amestecare a produselor de ardere din camera de ardere cu gaze recirculate. Cuptorul este echipat cu cameră de ardere cu arzător pe gaz natural. Temperatura gazelor în camera de ardere este de cca. 1200 °C, pe când temperatura maximal admisibilă a gazelor în camera de coacere a cuptorului este 300 °C. Valorile necesare ale temperaturilor în cele patru zone ale cuptorului sunt:  $t_{zona1} = 215 - 235$  °C,  $t_{zona2} = 240 - 250$  °C,  $t_{zona3} = 230 - 240$  °C,  $t_{zona4} = 220 - 230$  °C.

Se observă o diferență enormă de temperatură între temperatura gazelor în camera de ardere și cea necesară din camera de coacere. Reducerea valorii temperaturii gazelor din camera de ardere se realizează în urma procesului de amestecare a gazelor fierbinți cu gaze reci recirculate din camera de coacere.

În cazul când curenții, care se amestecă sunt purtătorii aceluiași gaz ideal, cu aceeași constantă a gazului  $R$ , și aceeași capacitate termică specifică  $c_p$ , este valabilă următoarea relație pentru calculul variației entropie (în care termenul 1 se referă la parametrii gazelor de ardere fierbinți din camera de ardere, 2 – parametrii gazelor de ardere recirculate în cuptor și 3 – parametrii amestecului de gaze, rezultat din comasarea primelor două), [4]:

$$\frac{\Delta \dot{S}}{\dot{m}_3} \approx x(1-x) \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1} \right)^2 + x \frac{R}{c_p} \left( \frac{p_1 - p_3}{p_3} \right) + (1-x) R c_p \left( \frac{p_2 - p_3}{p_3} \right) \geq 0, \quad (3)$$

în care  $x = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3}$  este raportul dintre debitul gazelor de ardere fierbinți în camera de ardere și debitul amestecului de gaze.

După cum se vede din relația (3), ireversibilitatea termică, creșterea entropiei și respectiv pierderile de exergie asociate amestecării cresc cu pătratul diferenței de temperatură ale celor două gaze care se amestecă.

### 4. Ireversibilitatea procesului de transfer de căldură în schimbătorul de căldură

O măsură efectivă de reducere a ireversibilității procesului analizat, ar fi înlocuirea procesului de amestecare cu un proces de transfer de căldură, adică în cazul de față, reducerea temperaturii se va efectua prin destinderea preliminară a corpului de lucru la producerea lucrului mecanic și transferul de căldură între gazele de ardere și aer necesar procesului de coacere. Deci se propune înlocuirea camerei de ardere a cuptorului cu o instalație de cogenerare. Schema de principiu al unei astfel de instalații este prezentată în fig.2.

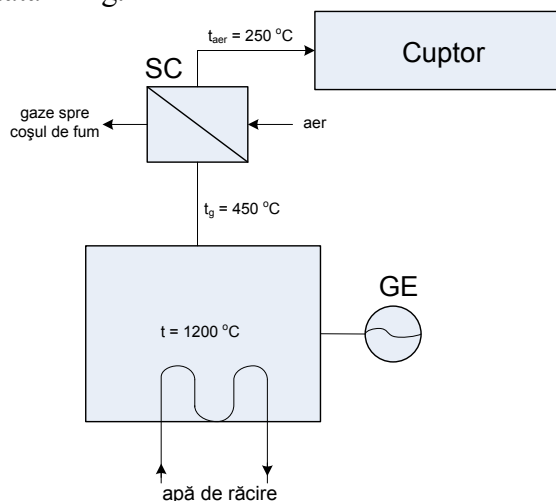


Fig.2. Schema de principiu a unei instalații cu motor cu ardere internă:  
MAI – motor cu ardere internă; SC – schimbător de căldură; GE – generator electric.

Astfel, energia obținută în urma arderii gazului natural în camera de ardere a motorului cu ardere internă ar servi pentru producerea energiei electrice pentru alimentarea cuptoarelor electrice (dacă secția de panificație analizată dispune de cuptoare atât pe gaz natural cât și electrice), iar gazele de ardere evacuate din motor, având temperatura cca. 450 °C, vor fi utilizate într-un schimbător de căldură pentru încălzirea aerului de coacere din cuptor.

Nu este acceptabilă utilizarea directă a gazelor de ardere evacuate din motor direct în mediul cuptorului deoarece acestea pot fi impurificate cu picături de ulei utilizat pentru ungerea elementelor mobile ale motorului.

Pierderile de exergie în urma ireversibilității transferului de căldură din schimbătorul de căldură, vor fi egale cu diferența între valorile medii ale exergiei gazelor fierbinți evacuate din motorul cu ardere internă:

$$E_x^g = Q \left( 1 - \frac{T_o}{T_{med}^g} \right) \quad (4)$$

și a aerului rece:

$$E_x^a = Q \left( 1 - \frac{T_o}{T_{med}^a} \right), \quad (5)$$

adică, după efectuarea unor transformări:

$$P_{ex} = E_x^g - E_x^a = Q \frac{T_o}{T_{med}^a} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{T_{med}^a}{\Delta T} \right)}, \quad (6)$$

unde:  $T_{med}^a$  este temperatura termodinamică medie a aerului în schimbătorul de căldură;

$T_{med}^g$  - temperatura termodinamică medie a gazelor de ardere în schimbătorul de căldură;

$\Delta T$  - diferența medie a temperaturii mediului care se răcește și a mediului care se încălzește;

$Q$  – fluxul de căldură schimbat în schimbătorul de căldură, între cei 2 agenți termici.

După cum se vede din relația (6), pierderile de exergie se majorează cu creșterea diferenței  $\Delta T$ , dar nu la pătrat ca în cazul proceselor de amestecare. Totodată, producerea celor două forme de energie, după re tehnologizarea instalației, va contribui la creșterea considerabilă a sumei fluxurilor de

exergie la ieșire din instalația modernizată -  $\sum_{i=1}^n E_x^e$  (fiindcă exergia lucrului mecanic este egală cu

valoarea lucrului mecanic produs, exergia energiei electrice, de asemenea, este egală cu valoarea energiei electrice produse), sporind randamentul de perfecțiune termodinamică al instalației calculat cu relația (1).

### Concluzii

Astfel, datorită unei diferențe de temperatură dintre valoarea temperaturii gazelor de ardere la ieșire din motor și cea a mediului din camera de coacere mult mai mică -  $\Delta t \approx 200$  °C, în loc de  $\Delta t \approx 950$  °C (tehnologia veche), gradul de ireversibilitate, respectiv pierderile de exergie în procesul analizat se vor micșora considerabil, sporind concomitent suma fluxurilor de exergie la ieșire din instalația modernizată.

### Bibliografie

1. V. Musteață. *Termodinamica tehnică și procese tehnologice*, Editura UTM, Chișinău, 2006.
2. D. Gohștein. *Современные методы термодинамического анализа энергетических установок*. Editura Energhia, Moskova, 1969.
3. I. Nerescu, V. Radcenco. *Analiza exergetică a proceselor termice*, Editura Tehnică, București, 1970.
- 4 A. Bejan. *Termodinamica tehnică avansată*. Editura Tehnică, București, 1996.