

# MODELE DE SIMULARE A INFLUENȚEI AERULUI DE RĂCIRE ȘI A TIPULUI DE COMBUSTIBIL ASUPRĂ PROIECTĂRII ȘI OPERĂRII UNEI INSTALAȚII DE CLINCHERIZARE

## SIMULATING THE INFLUENCE OF THE COOLING AIR TEMPERATURE AND OF THE FUEL SELECTION ON THE CLINKERING PLANT DESIGN AND OPERATION

ZENO GHIZDĂVEȚ\*, DOREL RADU, ANDREEA DAVID

<sup>1</sup>Universitatea POLITEHNICA București, Str. G. Polizu nr. 1, sector 1, 011061, București, România

*Un model matematic folosit la proiectarea instalațiilor de clincherizare este folosit în acest articol pentru a evidenția influența temperaturii aerului de răcire și a tipului de combustibil asupra necesarului de căldură și materii prime, și chiar și asupra lungimii cuptorului. Interesul nu este doar teoretic, deoarece diferențele cumulate pe un interval suficient de lung pot atinge valori importante.*

*A mathematical model used to design clinkering plants is used here to explore the influence of the cooling air temperature and of the fuel selection on both heat and raw materials requirements and even on the required kiln length. The interest is not purely theoretical as cumulated differences over a long range, could reach important values.*

**Keywords:** clinkering plants, combustion, mathematical model, design

### 1. Introducere

Instalațiile de clincherizare pot fi cercetate din punct de vedere matematic ca sisteme complexe. În lucrarea [1] a fost evidențiată o metodă de rezolvare pentru aceste sisteme, caracterizate de un număr mare de parametri, mulți dintre ei prezentând interdependențe.

În figura 1 este propusă o schemă a metodei de rezolvare. Acest articol prezintă prima etapă a modelului general, etapa de proiectare. Însă, o abordare riguroasă arată că pentru a obține rezultate satisfăcătoare trebuie parcurse iterativ toate etapele. Se consideră că etapa de proiectare trebuie urmată de predicție (predicția reprezintă un grad mai înalt de cunoaștere a procesului) și de identificarea valorii/valorilor optime (optimizare) ale funcției/funcțiilor obiectiv care vor fi utilizate în ultima etapă, controlul procesului. Datorită dimensiunii și a caracterului general s-a selectat prima etapă pentru a fi prezentată în acest articol. Trebuie menționat faptul că modelul prezentat în figura 1 este unul iterativ care se repetă până când sunt obținute rezultate satisfăcătoare.

Etapă de proiectare este prezentată schematic în figura 2. Este construită secvențial din mai multe module cu obiective punctuale, și totuși integrate în abordarea iterativă globală. În acest articol este prezentat modulul IV, care vizează necesarul de căldură,  $C_s$  și materii prime,  $F$  (a se vedea Nomenclatorul de la sfârșitul lucrării).

### 1. Introduction

Clinkering installations could be mathematically explored as being complex systems. We developed in [1] a methodology to deal with such systems, characterized by a large number of parameters, many of them having implicit interdependencies.

Such a methodology could be sketched, in our opinion, as in Figure 1. Here we deal only with the first phase of the global model, i.e. Design phase. However, in a thorough approach it becomes clear that somewhere all of them should be iteratively used, until satisfactory results will be attained. We consider that design efforts should be followed by Prediction (that is equivalent to a higher degree of knowledge about the process) and by identifying the optimal value(s) or region (Optimization) for the target function(s) that will be used in the last phase, Process Control. Due to reasons of space and also for their degree of generality we made the decision to select and discuss only the first phase. It has to be mentioned that the concept outlined in figure 1 is an iterative one that circles until satisfactory results could be attained.

The Design phase could be sketched as in Figure 2. It is built sequentially of several modules serving precise, specific purposes, yet integrated within a global, also iterative approach. In the paper we deal only with the Module IV, the one we give to

\* Autor corespondent/Corresponding author,  
Tel: +40 21 402 38 74, e-mail: [zghizdavet101@yahoo.com](mailto:zghizdavet101@yahoo.com)

Informații atât despre celelalte module, cât și despre unele aplicații industriale pot fi găsite în lucrarea [1].

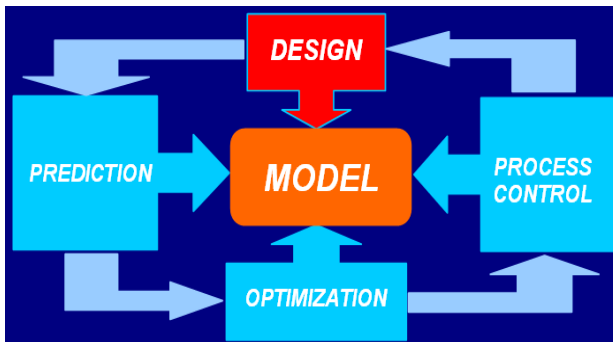


Fig. 1 - Model comprehensiv pentru un sistem complex  
A comprehensive model of a complex system.

Modulul I tratează optimizarea compoziției oxidice a clincherului (teste de laborator și/sau calcule). Compoziția corespunzătoare a clincherului poate fi obținută prin procesarea materiilor prime; selectarea materiilor prime se realizează în modulul II, în funcție de compoziția lor și de cea a cenușii rezultate în urma arderii combustibilului. Modulul III permite dimensionarea preliminară a componentelor principale ale instalației, astfel putând fi aproximată dimensiunea cuptorului rotativ. Această dimensionare se poate realiza prin mai multe metode [2]. Rezultatele constituie valori aproximative, necesare în modulul IV pentru o evaluare preliminară a pierderilor de căldură prin pereții cuptorului. Modulul V constă într-un model complex și precis de dimensionare a cuptorului rotativ. Aici sunt necesare toate datele din modulele precedente; astfel că rezultatul global și convergența soluției sunt condiționate de alegerea potrivită a modelelor din fiecare modul.

Modulul IV permite calcularea precisă a  $C_s$  și  $F$ , aflate în interdependență. Modulul IV constă într-o procedură iterativă, deoarece unele date de intrare nu sunt cunoscute ci estimate prin metode non-deterministe, iar unii parametri sunt dependenți chiar de datele de ieșire. Complexitatea calculului se poate aprecia astfel: debitul specific de gaze de ardere depinde de consumul specific de căldură  $C_s$  și de factorul de făină,  $F$ , având în vedere emisiile de  $CO_2$  și  $H_2O$  (reprezintă mai mult de o treime din totalul de gaze evacuate). La rândul său,  $F$  este influențat de debitul de praf evacuat împreună cu gazele de ardere din instalație și de cantitatea de cenușă rezultată din combustie (dacă există), ambii parametri fiind corelați cu  $C_s$ . Această precizare conduce la necesitatea calculării simultane a  $C_s$  și  $F$  pentru a fi evitate erorile.

## 2. Model de calcul pentru consumurile de căldură și materii prime

Articolul prezintă un model care permite evaluarea cantităților necunoscute fără a face

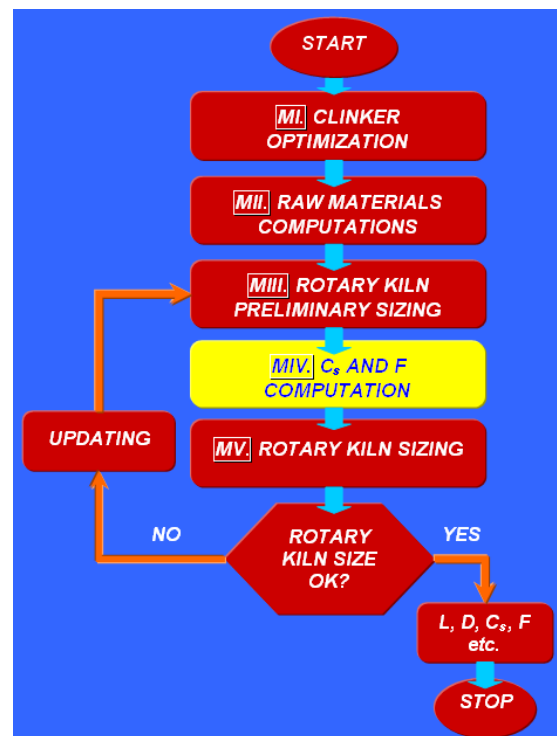


Fig. 2 - Schema etapei de proiectare pentru dimensionarea unui cuptor rotativ / Design phase sketch for the rotary kiln size calculation.

accurately compute heat and raw meal specific requirements,  $C_s$  and  $F$  (variables are described at the end of the paper). Information about the other modules and some industrial applications could be found in [1].

Module I deal with clinker oxide composition optimization (laboratory tests and/or calculus). The corresponding clinker composition could be obtained by processing the raw materials; their selection is made in Module II, according to their composition and by accounting for the elements in fuel(s). A preliminary sizing of the main components of the installation follows in Module III, allowing for an approximate size of the rotary kiln. That could be made by several methods [2]. The results serve as an approximate value, needed in Module IV for a further, preliminary evaluation of the heat losses through the kiln walls. Module V consists of a known [3] complex, yet accurate model that provides the exact size of the rotary kiln. It requires all data from previous modules; therefore, the global result and the convergence to the solution are affected also by the proper selection of the models within modules.

Module IV allows for a very accurate calculus of the  $C_s$  and  $F$ , seen in a mutual relationship. Module IV consists also in an iterative procedure, as some of the inputs are not known accurately but estimated through non-deterministic procedures and even some of the parameters are dependent on the very – unknown – outputs. To see the degree of intricacy of the calculus, take the

presupuneri grosiere, ci exprimând toate variabilele de proces posibile (debite masice și de gaze și toți parametrii derivați) în funcție de cele două funcții obiectiv ( $C_s$  și  $F$ ).

Pentru o instalație de clincherizare rezultă următoarele relații:

a) Ecuația de bilanț de masă 
$$\alpha \cdot C_s + \beta \cdot F = \gamma \quad (1)$$

unde:

$$\alpha = \frac{y^k}{Hi^k} \cdot xa \cdot a, \quad \beta = 1 - PC, \quad \gamma = m_{cl}^{re}$$

b) Ecuația de bilanț energetic 
$$\mu \cdot C_s + \nu \cdot F = \omega \quad (2)$$

unde:

$$\mu = \frac{y^c}{Hi^c} \cdot \left\{ i_{comb}^c + V_{as} \cdot (i_{ae}^r + x_{pae}^r \cdot i_{pae}^r) - V_{ga}^c \cdot \left[ (1 - r^{bp}) \cdot (i_g^{se} + x_{pg}^{se} \cdot i_{pg}^{se}) + r^{bp} \cdot (i_g^{bp} + x_{pg}^{bp} \cdot i_{pg}^{bp}) \right] \right\} + \frac{y^k}{Hi^k} \cdot \left\{ i_{comb}^k + V_{at} \cdot (i_{ae}^r + x_{pae}^r \cdot i_{pae}^r) - V_{ga}^k \cdot (i_g^{se} + x_{pg}^{se} \cdot i_{pg}^{se}) \right\} + 1$$

$$\nu = i_f + u \cdot i_u - \frac{PC}{\rho_{gt}} \cdot \left[ (1 - r^{bp}) \cdot (i_g^{se} + x_{pg}^{se} \cdot i_{pg}^{se}) + r^{bp} \cdot (i_g^{bp} + x_{pg}^{bp} \cdot i_{pg}^{bp}) \right] - u \cdot Lv$$

$$\omega = V_{af}^{s+c} \cdot (i_g^{se} + x_{pg}^{se} \cdot i_{pg}^{se} - i_{ar}^r) + V_{ae}^r \cdot (i_{ae}^r + x_{pae}^r \cdot i_{pae}^r - i_{ar}^r) + m_{cl}^{re} \cdot i_{cl}^{re} + V_{asupl} \cdot (i_g^{se} + x_{pg}^{se} \cdot i_{pg}^{se}) + Q_p + Q_{form} - (m_{pg}^{se} + m_{pae}^r) \cdot (i_f + u \cdot i_u)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (1) și (2) duce la obținerea valorilor pentru  $C_s$  și  $F$ .

### 2.1. Aplicația 1

Este binecunoscut faptul că anumiți parametri de proces arată atât evoluția aleatoare cât și evoluția sezonieră a unei instalații. În acest sens, un model matematic trebuie să țină seama de cel mai mare număr posibil de astfel de variații pentru a putea stabili intervalele de variație ale funcțiilor obiectiv. Instalațiile de clincherizare, dar nu numai, prezintă astfel de evoluții a căror tendința generală poate fi identificată după o perioadă relevantă de timp. Pe termen scurt pot apărea și fluctuații ocazionale. Un astfel de tipar poate fi chiar izolat vizual pe o perioadă dată de timp.

remark: the specific exhaust gas flow depends on specific heat requirement  $C_s$  and on the specific raw meal flow,  $F$ , by considering the important  $CO_2$ ,  $H_2O$  releases (more than one third of the total exhaust gas flow). At its turn  $F$  is influenced by the dust mass flow exiting the system, carried by the fumes, if any, and by the ash contained in fuel(s), both quantities being related to  $C_s$ . The observation calls for *simultaneous* calculus of the  $C_s$  and  $F$  to avoid unnecessary errors.

### 2. A model to compute heat and raw meal requirements

We developed a model that allows to compute the unknown quantities without making

any hazardous assumptions in such a way that all possible process variables (mass and gas flows and therefore derived parameters) should be expressed as being dependent on these two target functions ( $C_s$  and  $F$ ).

For a clinkering system we derive:

a) the *Mass balance* equation 
$$\alpha \cdot C_s + \beta \cdot F = \gamma \quad (1)$$

where:

$$\alpha = \frac{y^k}{Hi^k} \cdot xa \cdot a, \quad \beta = 1 - PC, \quad \gamma = m_{cl}^{re}$$

b) the *Heat balance* equation yields 
$$\mu \cdot C_s + \nu \cdot F = \omega \quad (2)$$

Where (see above):

Tabelul 1

Parametri utilizați în simulare / Parameters used in the simulation			
Nr.crt / Item	Mărime / Parameter	Interval de variație / Range	Observații / Observations
DATE DE INTRARE / INPUTS			
1.	Temperatura aerului de răcire / Cooling air temperature	10÷30°C	Mărime sezonieră / Seasonal pattern
2.	Pierderi la calcinare / Raw materials loss of ignition	0.348÷0.352	Mărime aleatoare / Random pattern
3.	Puterea calorifică inferioară a combustibilului / Low calorific value of the fuel	40564÷40696 kJ/kg fuel	
4.	Temperatura materiilor prime / Raw meal temperature	50÷80°C	
5.	Debitul de aer de răcire / Cooling air flow	2.76÷2.84 Nm <sup>3</sup> /kg cli.	
6.	Temperatura gazelor evacuate / Exhaust gases temperature	340÷360°C	
DATE DE IEȘIRE / OUTPUTS			
1.	Consum specific de căldură / Specific heat consumption, $C_s$		
2.	Factor de făină / Specific raw meal consumption, $F$		

Temperatura aerului de răcire, care pătrunde în racitorul grătar, este un astfel de parametru cu o variație sezonieră. Aerul de răcire este folosit pentru a recupera o mare parte din căldura sensibilă a clincherului în timp ce are loc răcirea rapidă, o condiție pentru cimentul portland obișnuit. Drept urmare acest aer este preîncălzit și o parte din el este utilizat ca aer secundar în cuptorul rotativ, o altă parte ca aer terțiar în calcinator, în timp ce restul părăsește instalația ca aer în exces. Aerul de răcire pătrunde în instalație cu o căldură sensibilă direct proporțională cu temperatura sa, fapt evidențiat în ecuațiile de bilanț termic. Deși importanța sa este redusă, trebuie totuși evidențiat faptul că și temperatura aerului în exces este unul din parametrii care influențează consumul specific de căldură, prin urmare și acesta va fi considerat în lucrare [3].

Este foarte dificilă identificarea și transpunerea în ecuații a interdependențelor complexe existente între parametrii de proces [4-7] (de exemplu, în cazul instalațiilor de clincherizare dar și cele de măcinare). Astfel, pentru a găsi un tipar, se impune o evoluție pentru un parametru, în timp ce restul parametrilor evoluează aleator.

Pentru ca simularea să fie cât mai apropiată de original, valori aleatoare (alese dintr-un interval de definiție corespunzător celor din situațiile reale) au fost atribuite altor cinci parametri importanți. Modelul a fost testat pentru a observa evoluția temperaturii aerului de răcire pe parcursul a 50 de intervale de timp. Tiparul de evoluție a temperaturii a fost ales (oarecum grosier) astfel încât să acopere variațiile din trei anotimpuri (primăvară-toamnă), așa cum arată figura 3. Valorile celorlalți parametri, inițial alese aleator, au fost ordonate în funcție de temperatura aerului de răcire. Tabelul 1 arată intervalele de valori pentru șase parametri independenți. Datorită valorilor aleatoare ale datelor de intrare 2-6 nu au fost identificate tipare specifice de evoluție.

Valorile intervalelor atribuite celor șase parametri au fost alese arbitrar (fără a fi corelate inițial) în funcție de valorile întâlnite frecvent în operarea instalațiilor de clincherizare.

Figura 3 arată doar regresiiile obținute în urma centralizării rezultatelor celor 50 de simulări, pentru temperatura aerului ( $T_{\text{aer}}$ ), consumul specific de căldură ( $C_s$ ) și factorul de făină ( $F$ ). Rezultatele punctuale nu au fost puse pe grafic alături de curbele de regresie deoarece graficul ar fi fost prea complicat. Toate regresiiile sunt polinomiale de gradul 4.

Analiza rezultatelor obținute evidențiază o corelație inversă între consumul specific de căldură  $C_s$  și temperatura aerului de răcire. Această observație nu este atât de evidentă în cazul factorului de făină  $F$  – a se vedea valoarea foarte scăzută a coeficientului de corelație  $R^2$  – oricum nu era de așteptat acest lucru. Explicațiile ar putea fi:

– ceilalți parametri ar putea influența mai

The two unknown quantities  $C_s$  and  $F$  should be obtained by solving the system of equations (1, 2).

### 2.1. Application 1

As it is known, some plant running parameters show both random and seasonal evolutions. Accordingly, a mathematical model should consider the highest possible number of these variations in order to define the ranges for the target functions. Clinkering plants, but not only, are affected by such evolutions in which it is possible to identify a general trend over a long, given, relevant time interval. At short range, random fluctuations could occur. Such pattern can be even visually isolated over a given time series. An example of a parameter that features a seasonal pattern is the cooling air temperature, air which enters the grate cooler. Cooling air is used for recovering the most part of the sensible heat of the clinker while ensuring the quenching and further quick cooling as required for the ordinary Portland cement type. The air is, as a result, preheated, and a part of it is used as secondary air in the rotary kiln, another one as tertiary air in the calciner while the remaining air leaves the system as excess air. The cooling air enters the system carrying a sensible heat directly proportional to its temperature, fact that can be reflected within the thermal balance. Although its contribution is relatively small, it has to be highlighted that also the cooling air temperature is one of the parameters influencing the specific consumption, and this influence is evaluated in the paper.

It is particularly difficult to pinpoint and to formalize the complex interdependencies existing between process parameters [4-7] in complex systems (clinkering plants and grinding plants are a good example of it). Therefore, in an attempt to isolate a pattern we chose to set a trend for one parameter, while letting the others to evolve randomly.

For the simulation to be as close as possible to reality, random values (within a customized definition range corresponding to real life situations) were set to other five important parameters. The model was tested for an evolution of the cooling air temperature that covers 50 time lags. The temperature pattern was set to imitate (a gross imitation, however) the one covering three seasons (spring-autumn), and it is shown in figure 3. Values for the other parameters, initially randomly chosen, were arranged according to the cooling air temperature. Ranges for the 6 independent parameters are shown in table 1. Due to the random nature of the values of the inputs 2 – 6, there weren't isolated patterns in their evolution. Values for the ranges attributed to the 6 parameters were set arbitrarily (without being initially correlated) but according to values usually encountered in cement plants operation.

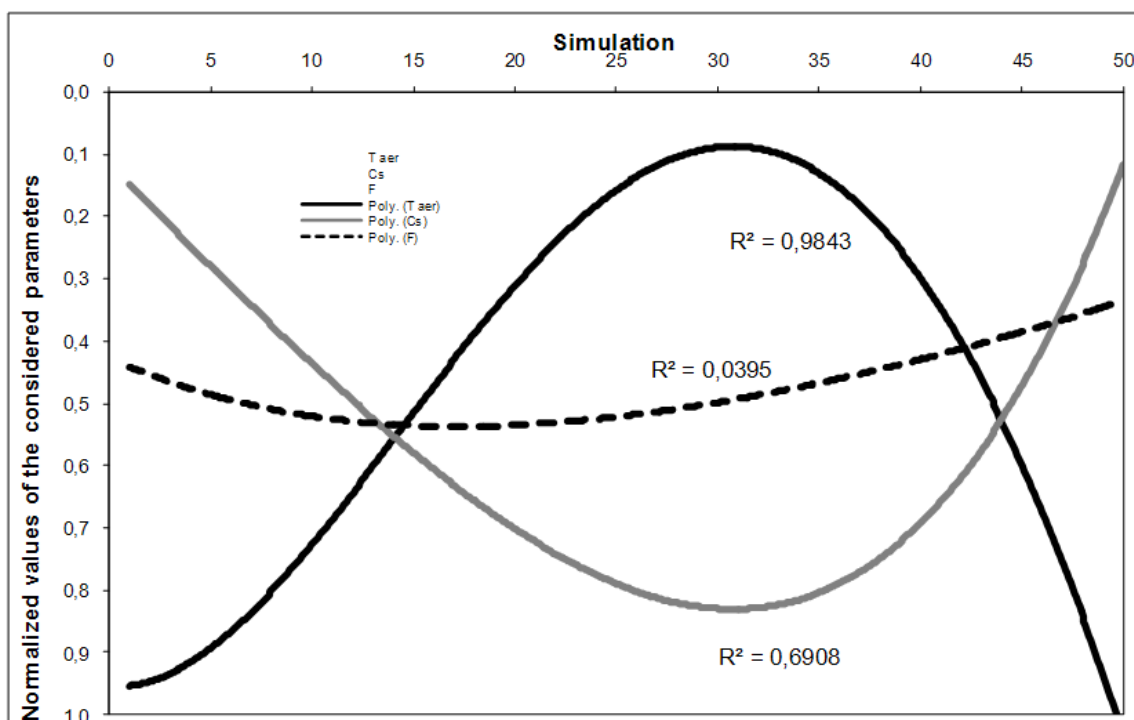


Fig. 3 - Valori normate ale temperaturii aerului de răcire, consumului specific de căldură și factorului de făină (sunt vizibile doar liniile de regresie) / Cooling air temperature, heat and raw meal consumptions in normalized values (only the regression lines are visible).

mult variația valorilor factorului de făină  $F$  – care prezintă o valoare foarte scăzută a  $R^2$  – în special pierderea la calcinare;

– diferența de maxim  $30^\circ\text{C}$  a aerului din instalație nu modifică semnificativ debitul de gaze evacuate (corespunzător variației  $C_s$  – cu valori reale) astfel încât să fie antrenate cantități mai mari de particule.

## 2.2. Aplicația 2

În această aplicație a fost modelată înlocuirea a trei tipuri de combustibil: lichid (CL), gazos (CG) și solid (CS) în cuptorul rotativ, în timp ce în calcinator a fost ars doar combustibil solid, altul decât CS (putere calorifică inferioară  $H_i=13700$  kJ/kg). Au fost considerate două cazuri: A) distribuția energetică a fost 40% în cuptorul rotativ și 60% în calcinator și B) 50% în cuptorul rotativ și 50% în calcinator. Aplicația are ca obiective: 1) determinarea bilanțurilor de masă și respectiv energetice obținute cu modelul din lucrarea [1] pentru cele șase variante (2 cazuri x 3 tipuri de combustibili) și analizarea diferențelor, atunci când ele apar, 2) determinarea dimensiunii exacte a cuptorului rotativ pentru toate cele 3 variante corespunzătoare cazului A, folosind ca date de intrare rezultatele obținute din bilanțurile masice și energetice. Lucrarea precedentă [8] (a doua din seria de patru) a arătat că înlocuirea unui combustibil cu altul nu influențează negativ gazele evacuate din punct de vedere al poluării mediului. Obiectivul lucrării a fost de a identifica și confirma influența din punct de vedere tehnologic a înlocuirii unui tip de combustibil cu altul.

Au fost folosite valori care se obțin într-o

Figure 3 shows only the regression lines obtained from the results of the 50 carried simulations, for all the *Air temperature* ( $T_{aer}$ ), *Heat* ( $C_s$ ) and *Mass* ( $F$ ) requirements. The reason why individual results weren't shown here is that scattered results along with regression curves will give a complicated picture of the chart. All of the regression lines are a 4<sup>th</sup> degree polynomial.

The analysis of the simulation results reveals the existence of an obvious inverse correlation between specific heat consumption  $C_s$  and the cooling air temperature. This observation is not as apparent for the raw meal consumption,  $F$  – see the very low  $R^2$  value – yet it was not to be expected. The reasons could be:

- the other parameters could be more influencing and also involved in the variance of the  $F$  values – that gives the very low  $R^2$  value – especially the loss of ignition!

- the difference of maximum 30 degrees Celsius in the inlet air wouldn't modify in such extent the exhaust gas flow (corresponding to the variation of the  $C_s$  – in real values!) to entrain particles in a visible amount.

## 2.2. Application 2

In this application we modeled the swap of three different fuels: liquid (CL), gaseous (CG) and solid (CS) in the rotary kiln, while in the calciner was burnt only solid fuel, other than CS (low calorific value  $H_i = 13700\text{kJ/kg}$ ). Moreover, we considered two cases, i.e. A) allocating 40% of the total amount of energy to the rotary kiln and 60% to the calciner and B) 50% to the rotary kiln and 50% to the calciner. The aims were: 1) to compute

instalație de clincherizare modernă pentru gazele evacuate, aerul în exces și concentrațiile de praf atât în gazele evacuate cât și în aerul în exces [1]. Caracteristicile principale ale combustibililor folosiți sunt prezentate în tabelul 2.

Tabelul 2

Puterea calorifică inferioară ( $H_i$ ), volumele gazelor de combustie: total ( $V_g$ ),  $CO_2$  ( $V_{CO_2}$ ) și  $H_2O$  ( $V_{H_2O}$ ) ale combustibililor CL, CG, CS / Low calorific values ( $H_i$ ), volumes of combustion gases: total ( $V_g$ ),  $CO_2$  ( $V_{CO_2}$ ) and  $H_2O$  ( $V_{H_2O}$ ) for the fuels CL, CG, CS

Combustibil Fuel	$H_i$ , kJ/kg comb.	$V_g$ , Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> , Nm <sup>3</sup> /kg comb	$V_{CO_2}$ , Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> , Nm <sup>3</sup> /kg comb	$V_{H_2O}$ , Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> , Nm <sup>3</sup> /kg comb
CL	40160	12.75	1.573	1.251
CG	36740	12.91	1.047	2.146
CS	21218	7.29	1.178	0.546

Pe baza relațiilor (1) și (2) s-au determinat consumul specific de căldură,  $C_s$ , și factorul de făină,  $F$ . Au fost observate diferențe atât în cazul înlocuirii unui combustibil cu altul, cât și în cazul modificării raportului energetic cuptor rotativ-calcinator, diferențe care trebuie analizate și interpretate pe baza bilanțurilor de masă și, respectiv, energetice.

Așa cum era de așteptat,  $C_s$  (fig.4) este corelat cu cantitatea de căldură transportată de gazele de ardere (fig. 5) în cazul primilor doi combustibili; diferențe interesante apar în cazul combustibilului CS. Aceste diferențe pot fi explicate analizând figura 6 unde este prezentat graficul pentru factorul de făină,  $F$ . Figura 6 arată că factorul de făină maxim,  $F$ , apare în cazul utilizării combustibilului CS. Deoarece concentrația de praf antrenat de gaze este fixată din cauze tehnologice și de protecția mediului, cantitatea totală de particule depinde de debitul de gaze, care la rândul său depinde de tipul de combustibil utilizat. Combustibilii generează volume diferite de gaze în urma combustiei, volume care trebuie comparate doar în cazul  $C_s$ . Acestor volume li se adaugă gazele tehnologice; aceste volume depind de factorul de făină,  $F$ . În consecință,  $C_s$  și  $F$  trebuie analizate împreună; se poate observa influența valorii factorului de făină (fig. 6) asupra  $C_s$  (fig.4); în cazul unei modelări clasice,  $C_s$  ar trebui corelat – considerând o singură instalație cu diametrul cuptorului fixat - doar cu  $Q_{ga}$ . De fapt, diferențele între figurile 4 și 5 corespunzătoare combustibilului CS pot fi explicate prin impactul valorilor factorului de făină,  $F$ .

În cazul debitului specific de gaze de ardere, combustibilul CL prezintă cea mai scăzută valoare (0.3974 Nm<sup>3</sup>/kg clincher), în timp ce CG are valoarea cea mai ridicată (0.4430 Nm<sup>3</sup>/kg clincher), la o distanță mică de CS (0.4329 Nm<sup>3</sup>/kg. clincher). Corelația dintre  $C_s$  și  $F$  explică figurile 4 și 5, însă nu și figura 6. Cu toate acestea, analizând figura 7 se poate evidenția cauza diferențelor atribuite

mass and heat balances based on the model given in the paper, for the six resulted alternatives (2 cases x 3 fuels) and to analyze the differences, if any, 2) to accurately compute the size of the rotary kiln for all three alternatives corresponding to Case A) by using as inputs the results of the mass and heat balances. From an earlier paper [8] (the second in that series of four) we learned that no notable effect will be exerted - from a polluting viewpoint - in exhaust gases. The interest in that paper is to identify and confirm the influence from the technological viewpoint of swapping fuels.

We set the temperatures of the exhaust gases, excess air and the dust concentrations in both exhaust gases, excess air to values normally expected for an effective, modern clinkering plant [1]. The major features of the fuels used in modeling are given in table 2.

Based on equations (1-2) we computed the specific heat requirement  $C_s$  and the specific raw meal requirement,  $F$ . Differences were observed when using different fuels and corresponding to different allocations of the heat among kiln and calciner that should be analyzed and interpreted through the mass and energy balances.

As it was to be expected, the  $C_s$  (fig. 4) correlates well to the amount of heat carried by the fumes (fig. 5) for the first two fuels; interesting differences occur for the CS fuel. These differences could be explained if we analyze figure 6 where  $F$  is plotted. Figure 6 shows that the maximum  $F$  corresponds to the use of the CS fuel. As the concentration of dust entrained by the gases is set by technological and environmental reasons, the total amount of particles depends on the gases flow, which, in turn, depends on the type of fuel to be used. Fuels generate different volumes of gases at combustion, volumes that have to be compared only when related to the  $C_s$ . To these volumes, technological gases are to be added; their volumes depend on the value of  $F$ . As a consequence,  $C_s$  and  $F$  should be analyzed in conjunction; a proof of that statement is the influence exerted by the  $F$  value (fig. 6) over  $C_s$  (fig. 4); in a classical modeling,  $C_s$  should be correlated – considering a single plant, kiln diameter set – only to  $Q_{ga}$ . In fact, differences corresponding to CS fuel between fig. 4 and fig. 5 could be explained by the impact of the  $F$  values.

In terms of specific combustion gases flow, CL features the smallest amount (0.3974 Nm<sup>3</sup>/kg clinker) while CG gives the maximum amount (0.4430 Nm<sup>3</sup>/kg clinker), followed closely by CS (0.4329 Nm<sup>3</sup>/kg clinker). This pattern explains fig. 4 and 5 but doesn't explain fig. 6 through the correlation existing between  $C_s$  and  $F$ . However, if we analyze fig. 7 we can identify the source of the differences attributed to CS use: a very sharp difference in the heat carried by the excess air (which is similar for the dust entrained – not shown here due the lack of space for both, fumes and

utilizării combustibilului CS: o diferență mică asociată căldurii aerului în exces (care se regăsește și în cazul prafului antrenat atât de gazele de ardere cât și de aerul în exces – acestea nu au fost prezentate datorită considerentelor legate de spațiu). În consecință, valoarea  $F$  pentru combustibilul CS este mărită datorită cantității de praf antrenat de aerul în exces, care trebuie utilizat pentru a asigura temperaturile stabilite pentru zonele principale ale instalației de clincherizare. Optimizarea cantității de aer de răcire ar putea duce la scăderea consumului specific de căldură în cazul utilizării combustibilului CS.

Al doilea obiectiv al acestei aplicații este de a determina dacă înlocuirea unui combustibil cu altul poate influența dimensiunile cuptorului rotativ, în special lungimea zonei de decarbonare. A fost considerat doar cazul A, unde 60% din totalul de

excess air). As a consequence, the  $F$  value for CS fuel is increased by the amount of dust entrained by the excess air, which has to be used to guarantee the temperatures set in the main points of the plant. An optimization of the amount of cooling air to be further done should, probably, allow for some energy savings in that particular case of the use of CS fuel.

The second target of this part of the paper is to seek if the swap of fuels could interfere with the rotary kiln's design, specifically with kiln's length. We considered only the Case A, where 60% of the amount of heat required for the process was allocated to the calciner, while the rest to the rotary kiln. The reason is that, given the same plant's constructive features – except for the kiln length which is to be determined here – in Case B it is difficult to guarantee the decarbonation degree of 95% at the entrance of the kiln as needed here.

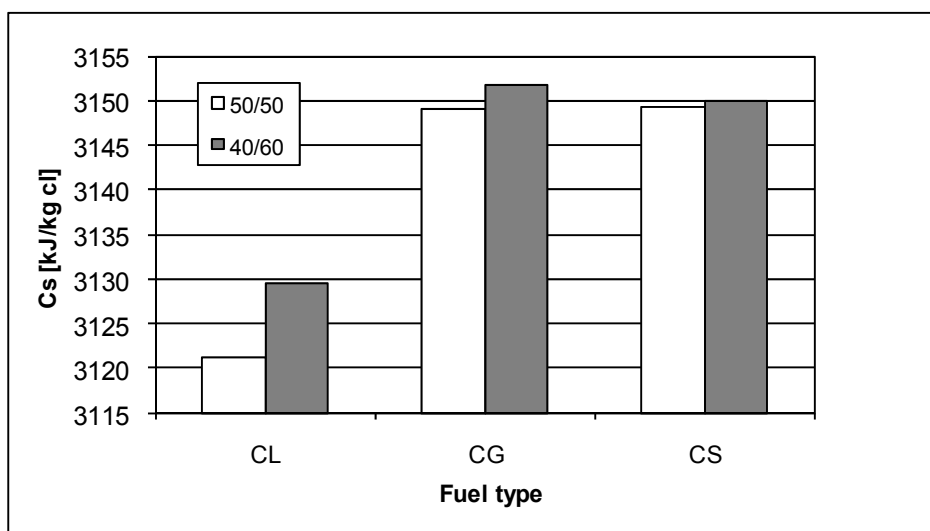


Fig. 4 - Consumul specific de căldură în cazurile A (40/60) și B (50/50), corespunzătoare combustibililor CL, CG, CS  
Computed specific heat requirement for Case A and B, corresponding to fuels CL, CG, CS.

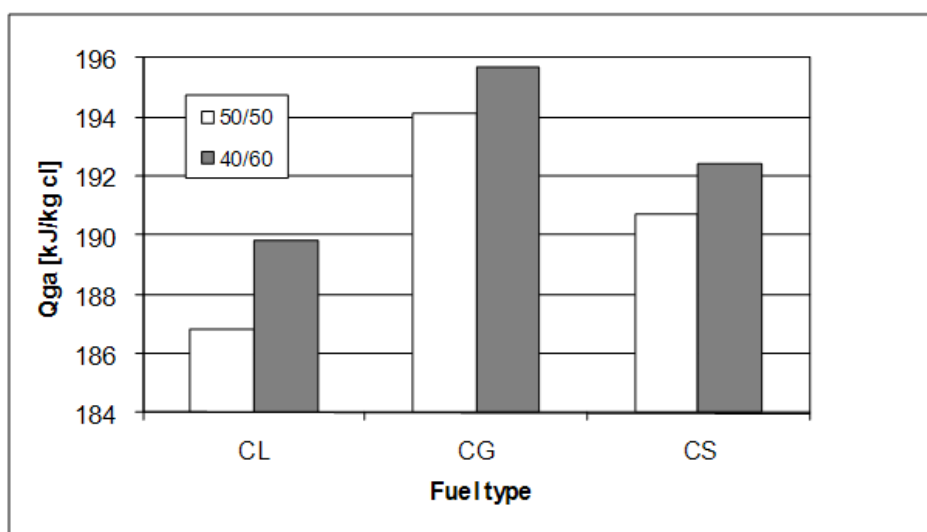


Fig. 5 - Căldura sensibilă a gazelor de ardere în cazurile A (40/60) și B (50/50), corespunzătoare combustibililor CL, CG, CS  
Computed sensible heat of exhaust gases for Case A and B, corresponding to fuels CL, CG, CS.

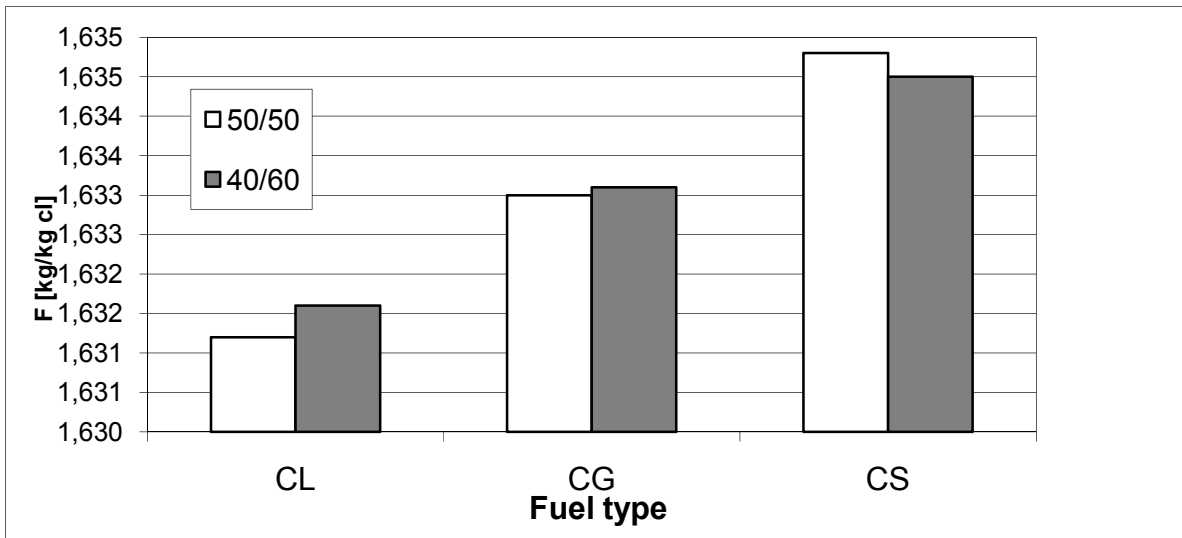


Fig.6 - Factorul de făină în cazurile A (40/60) și B (50/50), corespunzătoare combustibililor CL, CG, CS. *Computed specific raw meal requirement for Case A and B, corresponding to fuels CL, CG, CS.*

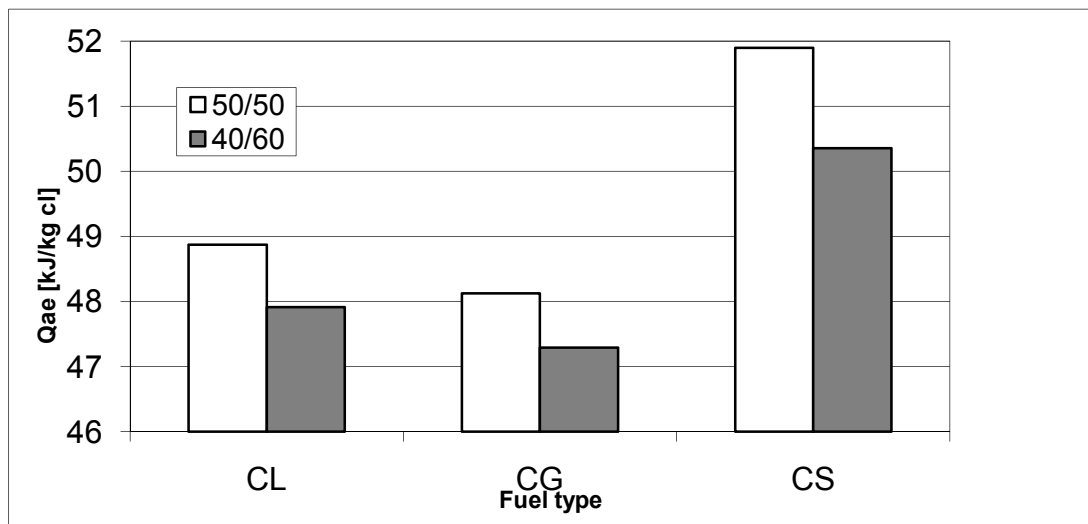


Fig.7 - Căldura sensibilă a aerului în exces evacuat din răcitorul grătar, în cazurile A (40/60) și B (50/50), corespunzătoare combustibililor CL, CG, CS / *Computed sensible heat of excess air evacuated from the grate cooler, for Case A and B, corresponding to fuels CL, CG, CS.*

căldură necesar procesului a fost distribuită calcinatorului, iar restul cuptorului rotativ.

Alegerea a fost făcută deoarece, fiind date caracteristicile constructive ale unei instalații – cu excepția lungimii care urmează a fi determinată - în cazul B este dificil de realizat un grad de 95% al decarbonării la intrarea în cuptor, așa cum este necesar.

Au fost efectuate calcule termotehnice, iar rezultatele sunt prezentate în tabelul 3. Lungimea zonei de ardere (clincherizare) este impusă din considerente tehnologice (este necesar un anumit interval de timp pentru realizarea procesului de clincherizare). În tabelul 3 se poate observa influența compoziției gazelor de ardere – CO<sub>2</sub> și H<sub>2</sub>O care realizează transferul termic radiativ-asupra coeficienților ( $\alpha_{gm}^R$ ,  $\alpha_{pm}^R$ ) și implicit asupra cantității de căldură transferată la pereți și la material. Aceste diferențe sunt apoi transformate în

Complete thermo-technical calculations were performed given the (selected) results in table 3. The burning (clinkering) zone length has to be set, due to the given productivity (not changed) and to the necessity to undergo all processes along a given time. The influence of the released combustion gases composition – CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O that are involved in the radiative heat transfer – over the heat transfer coefficients ( $\alpha_{gm}^R$ ,  $\alpha_{pm}^R$ ) and consequently on the amount of heat transferred to the walls and to the material could be easily observed in table 3. These differences are then translated into differences in kiln length through the decarbonation zone length  $L_{dec}$  and the ratio  $r$  = kiln length/kiln diameter. The differences in absolute values are small, however visible. In industrial terms, such values (1.21m of kiln length between the extremes, CL and CG) are not relevant, as the inputs of the process are variable



Tabelul 3

Caracteristici funcționale și constructive ale cuptorului rotativ (selecție) rezultate din modelarea matematică  
*Computed functional and constructive features of the rotary kiln*

Combustibil Zona cuptorului <i>Fuel/Kiln zone</i>	Temperatura peretelui <i>Wall temperature, °C</i>		$\alpha_{gm}^R, W/m^2K$		$\alpha_{pm}^R, W/m^2K$		$q_L, W/m$		$L_{dec}, m$	$r$	$q_v, W/m^2$	
	1	2	1	2	1	2	1	2	-	-	1	2
CL	1033	1755	123	301.5	416	1094	162020	1679799	20.55	14.682	5302.1	15327.4
CG	1050	1784	148	336	425	1125	178013	1778794	19.34	14.408	5397.6	15609.8
CS	1022	1765	108	312	410	1103	153541	1710813	20.30	14.626	5238.1	15406.8

Unde:  $q_L$  – unitatea de căldură emisă de gazele de ardere la material și peretele cuptorului;  $q_v$  – pierderile de căldură prin pereți / Remark:  $q_L$  – heat transferred from hot gases to the material and kiln wall on a linear unit;  $q_v$  – heat losses through the walls.

diferențe de lungime a cuptorului prin lungimea zonei de decarbonare  $L_{dec}$  și prin raportul  $r =$  lungimea cuptorului/diametrul cuptorului. Diferențele în valori absolute sunt mici, însă vizibile.

La nivel industrial, o astfel de valoare (1.21m diferența între minimul și maximul lungimii cuptorului, corespunzătoare CL și respectiv CG) nu este relevantă, deoarece datele de intrare ale procesului variază în anumite intervale, astfel cuptorul rotativ trebuie să fie suficient de lung pentru a corespunde tuturor acestor posibile fluctuații ale compoziției materiilor prime și ale combustibililor, granulometriei, condițiilor atmosferice și strategiilor de control al procesului.

Cu toate acestea, pe perioade lungi de timp aceste diferențe pot atinge valori importante. De exemplu:

- a) o diferență  $\Delta F = 0,001$  kg/kg clincher cumulată pe o perioadă de un an (considerând 300 de zile lucrătoare) înseamnă 13200 t;
- b) o diferență a  $\Delta Cs = 1$  kJ/ kg clincher cumulată pe o perioadă de un an (considerând 300 de zile lucrătoare) înseamnă:
  - 32870 kg combustibil CL;
  - 35930 Nm<sup>3</sup> combustibil CG;
  - 62210 kg combustibil CS.

În consecință, din considerente economice, aceste caracteristici duc la scăderea consumului de energie, alături de un control corespunzător al procesului și de o preprocesare corespunzătoare a materiilor prime și a combustibililor. De asemenea, este adevărat că selecția combustibilului(ilor) trebuie să țină cont și de alte criterii: preț, disponibilitate, modalități de depozitare, restricții de protecția mediului și alte considerente non-tehnologice. Mai mult de atât, datorită cenușii care se va regăsi în clincher, trebuie corectată dozarea materiilor prime astfel încât să se obțină compoziția dorită a produsului final.

at a certain extent, so the kiln has to be enough long to deal with all possible fluctuations in the raw meal and fuels composition, granulometry, atmospheric conditions and process control strategies.

However, when cumulated over a long period of time, these differences may attain important values. For example:

- a) a  $\Delta F = 0.001$  kg/kg clinker cumulated per year (considering 300 working days) represents 13200 to;
- b) a  $\Delta Cs = 1$  kJ/ kg clinker cumulated per year (considering 300 working days) represents:
  - 32870 kg CL fuel;
  - 35930 Nm<sup>3</sup> CG fuel;
  - 62210 kg CS fuel.

As a consequence, for economical reasons, these features represents sources of energy savings that could further add to the ones given by a proper process control and a proper preprocessing of the raw materials and fuels. It is also true that the selection of the fuel(s) has to be made according, also, to several other reasons: cost, availability, storage facilities, environmental restrictions and involved costs and other non-technological reasons. Moreover, through their content in elements existing in the clinker, it is compulsory to adjust the proportioning of the raw materials to guarantee the composition of the product.

### 3. Conclusions

The paper explores one of the facets of the clinkering plant's modeling. The influence of the cooling (input) air temperature and of the fuel selection could be small in terms of energy savings on a low range; however, more and more rigorous approaches have to be considered nowadays not only in modeling but also in plant's operation due to both technological and economical reasons.

\*\*\*\*\*

Notațiile utilizate în ecuațiile (1)-(2) sunt prezentate în nomenclator.  
*Symbols used in the mathematical model*

## Nomenclator

Mărime / <i>Parameter:</i>			Indice / <i>Index:</i>		Exponent / <i>Exponent:</i>	
Simbol <i>Symbol</i>	Explicite / <i>Explanation</i>	U.M. / <i>M.U.</i>	Simbol <i>Symbol</i>	Explicite / <i>Explanation</i>	Simbol <i>Symbol</i>	Explicite / <i>Explanation</i>
V	Debit volumetric de gaze (aer) <i>Volumetric flow of gases (air)</i>	Nm <sup>3</sup> /kg clincher	ar	Aer de răcire <i>Cooling air</i>	r	Răcitor <i>Cooler</i>
Cs	Consum specific de căldură <i>Specific heat consumption</i>	kJ/kg clincher	a_comb	Aer necesar combustiei <i>Combustion air</i>	c	Cuptor / <i>Kiln</i>
R	Fracția de by-pass <i>By-pass fraction</i>	—	as	Aer secundar <i>Secondary air</i>	k	Calcinator <i>Calciner</i>
F	Debit masic (teoretic) de făină brută / <i>Raw meal mass flow (theoretical)</i>	kg/kg clincher	at	Aer terțiar <i>Tertiary air</i>	s	Schimbător de căldură <i>Heat exchanger</i>
PC	Fracția de pierdere la calcinare <i>Loss of ignition (as fraction)</i>	—	ae	Aer în exces <i>Excess air</i>	bp	By-pass <i>By-pass</i>
i	Entalpie / <i>Enthalpy</i>	kJ/kg raw materials or kJ/Nm <sup>3</sup>	af	Aer fals <i>False air</i>	re	Evacuat din răcitor <i>Evacuated from cooler</i>
c	Căldura specifică / <i>Specific heat</i>	kJ/kg-grd raw materials or kJ/Nm <sup>3</sup> -grd	asupl	Aer suplimentar, necesar arderii totale / <i>Air în exces to ensure full combustion</i>		
xa	Fracția din cenușă care se regăsește în clincher / <i>Ash in clincher (as fraction)</i>	—	gt	Gaze tehnologice <i>Technological gases</i>		
a	Cantitatea de cenușă rezultată la arderea unui kilogram de combustibil solid / <i>Ash resulted at burning a kg of solid fuel</i>	kg/kg fuel	ga	Gaze ardere <i>Combustion gases</i>		
m	Debit masic / <i>Mass flow</i>	kg/kg clincher	g	Total gaze <i>Total gases</i>		
x	Concentrația maxim admisibilă de praf în gazul ... evacuate din utilajul ... / <i>Maximum allowed dust concentration in gas ... evacuated from apparatus ...</i>	kg/Nm <sup>3</sup>	comb	Combustibil <i>Fuel</i>		
Q	Debit căldură / <i>Heat flow</i>	kJ/kg clincher	p	Praf / <i>Dust</i>		
Lv	Căldura latentă de vaporizare <i>Latent heat of evaporation</i>	kJ/kg moisture	f	Făină <i>Raw meal</i>		
H <sub>i</sub>	Puterea calorifică inferioară a combustibilului / <i>Low calorific value of the fuel</i>	kJ/kg fuel	cl	Clincher <i>Clinker</i>		
y	Fracția de combustibil ars în utilajul ... / <i>Fuel fraction in apparatus ...</i>	—	u	Umiditatea din făină brută <i>Moisture content in raw meal</i>		
λ	Coeficientul de exces de aer în utilajul ... / <i>Excess air coefficient in apparatus ...</i>	—	fiz_comb	[căldura] sensibilă a combustibilului / <i>Sensible [heat] of the fuel</i>		
C, H, S, O, W	Conținutul în carbon, hidrogen, sulf, oxigen, apă al combustibilului / <i>Carbon, hydrogen, sulphur, oxygen, water content in fuel</i>	kg/kg solid fuel	l	Pierdută / <i>Lost</i>		
			form	[căldura de] formare / <i>[heat of] reaction</i>		

Entalpiile sunt explicitate cu relațiile:

$$\begin{aligned}
 i_{comb}^c &= c_{comb}^c \cdot g_{con}^c & i_g^{se} &= c_g^{se} \cdot g_g^{se} & i_{ae}^r &= c_{ae}^r \cdot g_{ae}^r \\
 i_{comb}^k &= c_{comb}^k \cdot g_{con}^k & i_{pae}^r &= c_{pae}^r \cdot g_{pae}^r & i_{ar}^r &= c_{ar}^r \cdot g_{ar}^r \\
 i_g^{bp} &= c_g^{bp} \cdot g_g^{bp} & i_{pg}^{bp} &= c_{pg}^{bp} \cdot g_g^{bp} & i_f &= c_f \cdot g_f \\
 i_{pg}^{se} &= c_{pg}^{se} \cdot g_g^{se} & i_u &= c_u \cdot g_f & i_{cl}^{re} &= c_{cl}^{re} \cdot g_{cl}^{re}
 \end{aligned}$$

### 3. Concluzii

Această lucrare prezintă una din fațetele modelării unei instalații de clinkerizare. Influența temperaturii aerului de răcire (introdus) și a alegerii combustibilului pot determina pe perioade scurte de timp scăderi nu foarte importante ale consumurilor de energie; însă, în prezent trebuie considerate abordări din ce în ce mai riguroase nu doar în modelare, dar și în operarea instalațiilor datorită deopotrivă considerentelor tehnologice și economice.

#### REFERENCES

1. Z. Ghizdăveț, and D. Radu, Mathematical methods in cement industry (in Romanian), Ed. MATRIX ROM, Bucharest, 2008.
2. D. Radu, and Z. Ghizdăveț, Rotary clinkering kilns design. Part I – Statistical models for clinkering kiln design. Romanian Journal of Materials, 2008, **38** (3), 183.
3. I. Teoreanu, H. Rehner, M. Thaler, and D. Radu, Operations, equipment and thermo-technological installations in silicates industry. Calculus: exercises, design examples (in Romanian), Didactical and Pedagogical Publishing House, Bucharest, 190-194, 1983.
4. G. Locher, Mathematical models for the cement clinker burning process. Complete plant, Zement-Kalk-Gips 2002, **55** (7), 26.
5. Wang Hai-dong, Qiu Guan-zhou, Huang Sheng-Sheng, Cement industry control system based on multi agent, J. Cent. South Univ. Technol., **11**(1), 2004.
6. Oguz H. Dagci, M. Önder Efe, Okyay Kaynak, A nonlinear learning control approach for a cement milling process, Proc. IEEE International Conference of Control Applications, Mexico, 2001.
7. M. Boulvin, A.V. Wouwer, R. Lepore, C. Renotte, and M. Remy, Modeling and control of cement grinding processes, Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2003, **11** (5), 715.
8. D. Radu, A. David, and Z. Ghizdăveț, The influence of some thermo-technical parameters on the flow and chemical composition of the hot gases exhausted from the clinkering plants, Romanian Journal of Materials, 2010, **40** (3), 183.

\*\*\*\*\*

## MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE / SCIENTIFIC EVENTS



### Concrete Solutions 2011, 4<sup>th</sup> International Conference on Concrete Repair 26-28th Sept. 2011 - Technical University of Dresden - Germany

The Conference is supported by the following organisations: The Technical University of Dresden, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein VDB (German Concrete Society), DAfStb, the German Society for Reinforced Concrete, RILEM, the American Concrete Institute, INSA Rennes, The University of Padova, Queen's University, Belfast, The Concrete Society UK and The Institute of Concrete Technology, Meissen.

The conference themes are as follows:

- Patch Repair
- Electrochemical Repair
- Strengthening Materials and techniques/Repair with Composites
- Surface Protection Methods and Materials
- Repair of Fire Damage
- NDT and Diagnosis of Problems
- Service Life Modelling
- Whole Life Costing
- Risk Management
- Case Studies

As with the last three conferences, the Proceedings will be published and a copy provided to all delegates and authors. Students Attend Free at the Conference!!

There will be two post-conference workshops,

see the <http://www.concrete-solutions.info/Programme.html> link for details

**Contact:** <http://www.concrete-solutions.info/Contact-Us.html>

\*\*\*\*\*