

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

CIBv 2010

12 – 13 November 2010, Braşov

DES TUBES RADIANTS, AUX GAZ PROVENANT DE LA COMBUSTION DU BOIS OU DE PELLETS, UTILISÉS AU CHAUFFAGE DES EGLISES

Ioan CĂLDARE*

* Dr. Ec. Eng., Professeur, Université Transilvania du Brasov, Faculté de génie civil

Auteur correspondant: Ioan CĂLDARE, E-mail: ioan.caldare@unitbv.ro

Résumé: Le chauffage des églises par des tubes radiants, chauffés aux gaz provenant par la combustion du bois ou de déchets de bois, représente une solution bien économique et efficace pour assurer le confort thermique. Le tube radiant détermine un chauffage immédiat, rapide, ayant une petite inertie thermique et assurant un confort minime, dès qu'on a mis en marche le système de combustion. Le foyer de combustion du bois est placé en dehors de l'église ce qui accroît beaucoup la sécurité du système de chauffage et assure un degré élevé d'hygiène et de propreté à la fois à l'intérieur de l'église.

Mont clés: tube radiant, flux de chaleur, le chauffage

1. LE SPECIFIQUE DE LA COMBUSTION DU BOIS ET DES DECHETS DU BOIS

La combustion des grands morceaux de bois est avantageuse pour les petites installations, tenant compte qu'il n'est pas nécessaire de posséder des installations spéciales pour stocker et manœuvrer le combustible.

Le désavantage majeur de ce système de combustion du bois c'est qu'il ne permet pas une automatisation complète du processus de combustion, car il est nécessaire de l'alimenter avec du bois par petits intervalles de temps.

La pelletisation consiste à presser la sciure dans de petites cylindres ayant une grande densité. Les pellets doivent avoir les caractéristiques suivantes :

Table 1 Caractéristiques du pellets

diametre Ø 4 – 10 mm	longueur $\leq 5 \cdot \text{Ø}$	densité $\geq 1,12$ kg/dm ³	humidité ≤ 10 %
contenu de cendres $\leq 0,5\%$	pouvoir calorifique ≥ 18 MJ/kg	contenu de soufre $\leq 0,04\%$	

La pelletisation a les avantages suivants:

on diminue 10 fois l'espace de stockage;
 on améliore des conditions d'écoulement du matériel granuleux et la possibilité de son dosage;
 on élimine les blocages d'écoulement dans les silos ou les installations de transport;
 on augmente la densité énergétique spécifique du volume, exprimée en KJ/m³ de masse solide combustible.

Les chaudières pour la combustion des pellets sont caractérisées par l'automatisation de l'alimentation en fonction de la charge de la chaudière de sorte que le fonctionnement est continu.

Table 2 Des caractéristiques de combustion bois - pellets:

DES CARACTÉRISTIQUES DE COMBUSTION BOIS - PELLETS			
COMPOSITION	MASSE SECHE	PELLETS	BOIS
W	0	3	12
C	49.6	48.11	43.65
H	6	5.82	5.28
O	43	41.71	37.84
N	0.2	0.194	0.176
A	1.2	1.164	1.056
COMBUSTION			
V _o	4.568	4.431	4.019
VCO ₂	0.926	0.898	0.814
VN ₂	3.610	3.502	3.177
VH ₂ O	0.745	0.760	0.805
V _{go}	5.280	5.159	4.796
POUVOIR CALORIFIQUE			
Hi -kJ/kg	18779	18140	16224
Hi -kcal/kg	4486	4333	3876

Les pouvoirs thermiques nécessaires aux églises s'encadrent dans les limites usuelles de la combustion du bois ou des pellets: pour une église de grandes dimensions, de 400 m³, ayant un flux de chaleur de 400 W/m³ et un rendement de l'installation de chauffage de 80%, il est nécessaire un pouvoir du foyer de 200 KW avec une consommation horaire de bois d'environ 45 Kg/h.

2. LES TUBES RADIANTS UTILISÉS AU CHAUFFAGE DES EGLISES

Le régime des températures du tube radiant est spécifique à la combustion du bois avec des excès d'air élevés pour éviter la formation des phénols et goudrons qui apparaissent pendant la combustion à l'air insuffisant qui mène à la formation des produits de craquage thermique.

Pour les situations typiques à de pareilles installations de chauffage, on écrit les valeurs de température à la surface du tube radiant ainsi que celles des flux de chaleur radiante émises.

Le calcul de tubes radiants aux gaz provenant de la combustion du bois est spécifique à ce combustible ayant des températures de combustion beaucoup plus basses que les températures obtenues par la combustion du gaz naturel. C'est pourquoi les diagrammes et les programmes de calcul pour les tubes radiants utilisés pour le combustible gazeux ne peuvent être appliqués aux tubes radiants utilisés avec une combustion de bois.

Ayant en vue le spécifique des tubes radiants dans les églises, un calcul par éléments finis le long du tube serait trop prétentieux et trop difficile à appliquer pratiquement.

Pour ce cas, on a élaboré une méthode de calcul aux valeurs médiales sur toute la longueur du tube radiant et aux valeurs particulières pour la partie initiale et pour la partie finale.

3. METHODE DE CALCUL ET SON APLICATION PARTICULIERE POUR UN TUBE RADIANT

La solution de tube radiant pour le chauffage d'une église est liée au spécifique de la pièce réchauffée : chambre longue avec une largeur petite et grande hauteur. La solution du système de chauffage c'est un tube radiant placé contre le mur latéral, à une hauteur d'environ 6 m pour une bonne uniformisation du flux de chaleur sur le récepteur, ayant le bout chaud à l'entrée de l'église, source importante de refroidissement de l'espace.

De plus, vers le bout ayant une température moyenne, se trouve l'autel, prévu d'une tour et une coupole ayant un effet de tirage naturel qui réalisera une circulation d'uniformisation par convection horizontale, de la porte à l'autel.

À la campagne, pour une église de dimensions moyennes, on préconise les données suivantes concernant la consommation de chaleur :

Table 3 Débit de chaleur nécessaire utile:

DEBIT DE CHALEUR NECESSAIRE UTILE	
$Q=q*L*B*H$	
L longueur	15
B largeur	8
H hauteur	6
q flux unitaire volumique [W/mc]	30
Q [W]	21600

Tenant compte des dimensions de la pièce, le tube radiant de chauffage aura les dimensions suivantes :

DIMENSION DU TUBE RADIANT	
Diamètre extérieur Dtr = 0.15 m	
Longueur utile (tub en forme de U) Ltr = 2 x 12 m	

Table 4 Calcul pour bois et pellets:

$tt=(ALF*Vo*c_{pa}+Hi)/((V_{go}+(ALF-1)*Vo)*c_{pg})$		Pellets	Bois
Excès d'air	ALF	1.5	2
Air nécessaire a la combustion	V0	4.431	4.019
Chaleur spécifique de l'air	c _{pa}	1.298	1.298
Pouvoir calorifique	Hi	18140	16224
Volume spécifique de gaz	V _{go}	5.159	4.796
Chaleur spécifique de gaz	c _{pg}	1.63	1.55
Température de combustion	tt	1509.81	1188.182

La température au bout chaud du tube radiant est pratiquement la température théorique de combustion, tt [°C], car le trajet entre le foyer de combustion du combustible et l'entrée dans le tube radiant sera très bien isolé thermiquement par une maçonnerie réfractaire et une isolation légère, pour éviter les pertes de chaleur et pour la sécurité à l'incendie à la fois.

Ensuite on fait le calcul pour les deux types de combustibles préconisés :bois et pellets. Des différences plus significatives entre le deux combustibles sont le pouvoir calorifique et surtout l'excès d'air dans le processus de combustion qui est beaucoup plus petit dans le cas des pellets. Pour les calculs thermiques il est nécessaire la construction du diagramme de la chaleur spécifique des gaz provenant de la combustion du bois en fonction de la température.

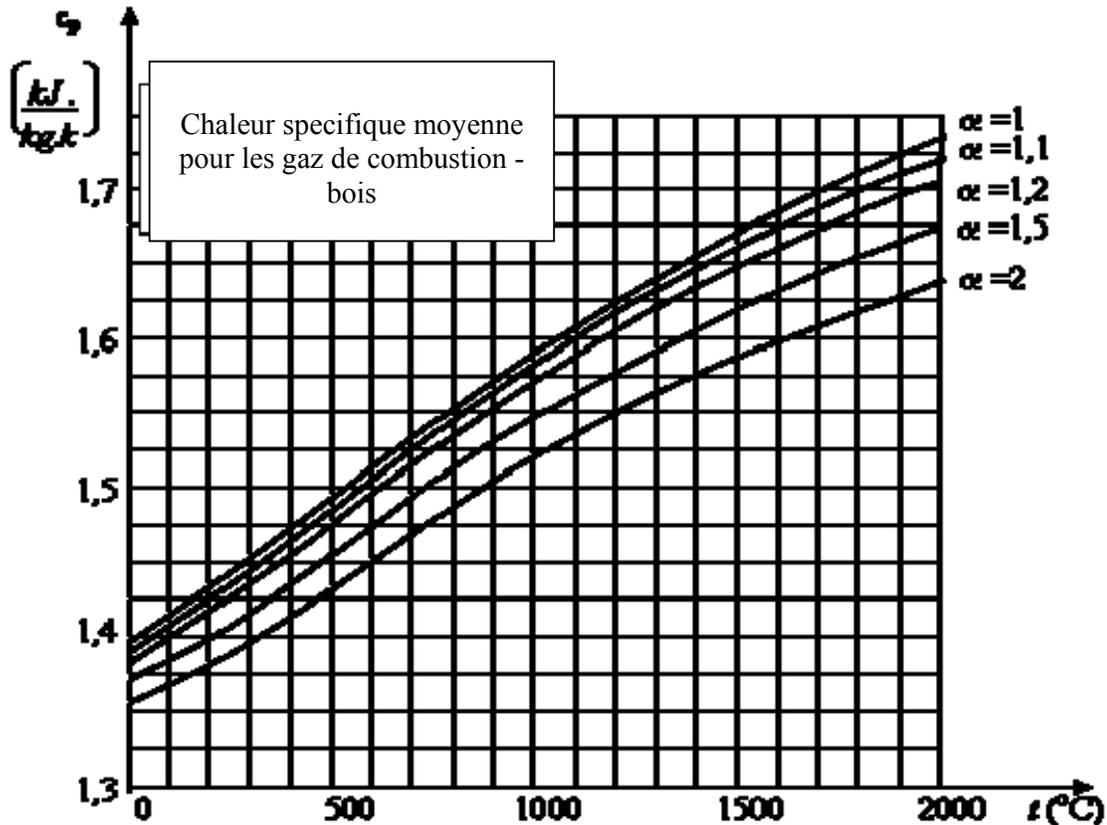


Fig. 1 Chaleur spécifique moyenne des gaz de combustion- bois

Ensuite on calcule le rendement du tube radiant, EFF, à partir des flux de chaleur entrés et évacués, Dans ce calcul on initialise la température d'évacuation des gaz, t_{ev} , qui finalement va être vérifiée par l'égalité des flux de chaleur intérieurs et extérieurs.

Table 5 Le rendement du tube radiant:

LE RENDEMENT DU TUBE RADIANT

$$EFF = (V_{go} + (ALF - 1) * V_o) * (t_t * c_{pgtt} - t_{ev} * c_{pgtev}) / H_i$$

V_{go}	5.159	4.796
ALF	1.5	2
V_o	4.431	4.019
t_t	1509.815	1188.182
c_{pgtt}	1.63	1.55
t_{ev}	200	400
c_{pgtev}	1.4	1.38
H_i	18140	16224
EFF	0.886646	0.663235

Il en résulte le débit nécessaire de combustible, B, pour le chauffage avec le tube radiant:

Table 6 Débit nécessaire de combustible:

DÉBIT NECESSAIRE DE COMBUSTIBLE

$$B=Q/1000/H_i/EFF \text{ [kg/s]}$$

$$B_h=Q/1000/H_i/EFF/3600 \text{ [kg/h]}$$

Q [W]	21600	21600
H _i [kJ/kg]	18140	16224
EFF	0.886646	0.663235
B [kg/s]	0.001343	0.002007
B _h [kg/h]	4.834688	7.226552

On constate que le débit de pellets ou de bois est relativement petit, d'ordre 5...7 Kg/h, ce qui ne pose aucune difficulté dans l'exploitation.

Donc, la particularité du calcul est celle de calculer la température moyenne radiante du tube, présenté ci-dessous:

Table 7 Température moyenne radiante du tube:

TEMPÉRATURE MOYENNE RADIANTE DU TUBE

$$T_{mr}^4=Q/(Co*EPS*D_{tr}*L_{tr}*10^{(-8)}-T_o^4 \text{ [K}^4\text{]}$$

Q	21600	21600
Co	5.76E-08	5.76E-08
EPS	0.85	0.85
D _{tr}	0.15	0.15
L _{tr}	24	24
t _o	18	18
T _o	291	291
T _{mr}	1.15E+11	1.15E+11
T _{mr}	5.83E+02	5.83E+02
t _{mr}	309.82	309.82

On constate une température moyenne bien convenable pour les tubes radiants.

C'est la présentation détaillée du calcul qui suit avec la détermination des températures des deux bouts, d'entrée et d'évacuation du tube radiant, pour les deux types de combustibles.

4. LE CALCUL DE LA TEMPERATURE DU TUBE RADIANT

Les données nécessaires au calcul sont les suivantes:

Table 8 Données nécessaires au calcul :

	pellets initial	pellets final	bois initial	bois final
temp.				
gaz	1509.815	200	1188.182	400
LAM	0.355037	0.24226	0.327344	0.25948
NIU	2.77E-04	2.74E-05	2.11E-04	6.06E-05
PR	0.529019	0.66	0.561182	0.64
Vgo	5.159	5.159	4.796	4.796
ALF	1.5	1.5	2	2
Vo	4.431	4.431	4.019	4.019
Vg	7.3745	7.3745	8.815	8.815
tg	1509.815	200	1188.182	400
$V_{gt}=V_g*(t_g+273)/273$				
Vgt	48.15885	12.77706	47.18067	18.50181

On calcule ensuite le coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur du tube. Pour le tube radiant fonctionnant avec des pellets on a introduit dans la partie finale (20%) une pièce de type bande pliée pour intensifier la turbulence.

Le coefficient Ct tien compte de l'intensification de la convection. Cela permet l'augmentation des performances convectives du tube radiant.

Le tube radiant au bois manque d'éléments pour intensifier la turbulence, car les gaz ont un plus grand contenu en cendres et de COV ce qui pourrait éventuellement mener aux colmatages.

Par conséquent, le rendement du tube radiant au bois est moins élevé que celui au pellets.

Table 9 Convection gaz:

CONVECTION GAZ

Vitesse des gaz $w = B * V_g / (3.14 * D_i^2 / 4)$

B [kg/s]	0.001343	0.001343	0.002007	0.002007
Di [m]	0.142	0.142	0.142	0.142
w [m/s]	4.085975	1.084053	5.983377	2.34637
$Re = w * D_i / NIU$				
Re	2092.016	5613.983	4030.082	5495.648
coef. d'intensificateur de la turbulence Ct				
Ct	1.2	1.2	1	1
$ALF_c = LAM / D_i * 0.024 * Re^{0.8} * Pr^{0.4} * Ct$				
ALFc	25.30565	41.55475	33.63717	36.01758

Le coefficient de transfert de chaleur par radiation des gaz à l'intérieur du tube:

Table 10 Radiation des gaz:

RADIATION DES GAZ

$$P_{H_2O} = V_{H_2O} / (V_{g0} + (\alpha - 1) * V_0) ; P_{CO_2} = V_{CO_2} / (V_{g0} + (\alpha - 1) * V_0) ; s = 0,9 * d_i$$

$$kg = (0,8 + 1,6 * p_{H_2O}) / ((p_{H_2O} + p_{CO_2}) * s)^{0,5} * (1 - 0,38 * (t_{gm} + 273) / 1000) * ((p_{H_2O} + p_{CO_2}))$$

$$\epsilon_g = 1 - \text{EXP}(-kg * s)$$

$$\alpha_{rg} = C_0 * (\epsilon_p + 1) / 2 * \epsilon_g * (t_{gm} + 273)^3$$

VH2O	0.76	0.76	0.805	0.805
PH2O	0.10306	0.103058	0.0913	0.0913
VCO2	0.898	0.898	0.814	0.814
PCO2	0.12177	0.121771	0.0923	0.0923
S	0.1278	0.1278	0.1278	0.1278
kg	0.412772	1.049762	0.504437	0.844142
EPSg	0.051385	0.12555	0.062433	0.102266
ALFr	15.51383	0.707885	10.37748	1.660887

A l'aide de ces coefficients de transfert de chaleur on peut déterminer le flux de chaleur reçu par le tube des gaz de combustion, q_i [W/m] :

Table 11 Des flux de chaleur a l'intérieur:

DES FLUX DE CHALEUR A
L'INTÉRIEUR

$$q_i = (ALF_c + ALF_r) * (t_g - t_p) * 3.14 * D_i$$

moyen	pellets	bois
t_p	309.82	309.82
t_g	854.9073	819.0912
ALF _c med	33.4302	34.82738
ALF _r med	8.11086	6.019184
q_i	10096.37	9275.272

Le flux de chaleur émis par radiation de l'extérieur du tube est q_r [W/m] :

$$q_r = C_0 * EPS_p * D_i * ((t_g + 273)^4 - (t_p + 273)^4)$$

q_r	10449.69	9087.151
-------	----------	----------

Le deux flux de chaleur q_i et q_r doivent être égaux (+/- 5%).

Si la différence est plus grande il faut corriger l'unique facteur initialisé: la température des gaz a l'évacuation du tube radiant.

LA TEMPÉRATURE A LA SORTIE DU TUB RADIANT

tev	200	400
-----	-----	-----

Comme le calcul se fait dans un programme Excel, le remplacement d'une valeur dans la ligne respective mène à la correction de tous les calcul donc on constate immédiatement s'il est nécessaire la correction ou le calcul s'est fermé sur une erreur admissible.

5. CONCLUSIONS CONCERNANT LE CONFORT

Même si l'on est parti d'un chiffre caractéristique usuel dans le dimensionnement des installations de chauffage: q flux unitaire de volume $[W/mc] = 30$, on fait une vérification supplémentaire concernant l'intensité du flux de chaleur radié sur l'unité de surface réceptrice.

Le tube radiant est placé contre le mur latéral de la pièce ayant un écran réfléchissant qui dirige le flux radié, donc l'angle de dispersion de la radiation est bien précisé. La hauteur à laquelle est placé le tube radiant et cet angle de dispersion de la radiation détermine une surface sur le sol qui reçoit la radiation.

La baisse de la hauteur du placement du tube radiant mènera à la diminution de la surface réceptrice, donc à l'accroissement du flux spécifique de radiation sur la surface.

Au contraire, la hausse de niveau du placement du tube radiant mènera à l'agrandissement de la surface réceptrice, donc à la diminution du flux spécifique de radiation sur surface.

L'exemple d'application détaillé dans l'exposé, a présenté un cas typique. Aux églises ayant une largeur plus grande, le calcul peut montrer la nécessité du placement de deux tubes radiants sur les deux côtés latéraux.

Aux églises de longueurs plus grande on peut installer le foyer de bois au milieu du mur extérieur de l'église et les gaz provenant de la combustion vont se ramifier à l'intérieur vers la droite et la gauche.

Il en résulte que le chauffage des églises avec des tubes radiants est techniquement toujours possible avec les avantages économiques présentes.

En tenant compte aussi d'une grande uniformité des situations constructives, on peut réaliser des installations modulaires typisées, facilement à monter dans n'importe quelle église de sorte qu'une telle installation de chauffage est très économique.

BIBLIOGRAPHIE

1. CĂLDARE, I., *Contribuții la studiul încălzirii cu tuburi radiante de joasă temperatură*, Teză doctorat, 2005.
2. ANTONESCU, N., *Procesele de ardere. Bazele fizice și experimentale*, Editura Matrix Rom, București, 2002.

Date de réception Septembre 20, 2010