

De toepassing van rookgaswarmte-wisselaars in de grofkeramische industrie



J.C. Marks
Stichting Technisch Centrum
voor de Keramische Industrie

Auteursbeschrijving:

Hans Marks (45) is in 1977 afgestudeerd aan de Hogeschool Enschede in de studierichting Werktuigbouwkunde en in 1994 aan de Katholieke Universiteit Nijmegen in de studierichting Bedrijfskunde. Sinds 1978 is hij werkzaam bij het Technisch Centrum voor de Keramische Industrie, waar hij thans de functie bekleedt als hoofd van de afdeling techniek. Als adviseur is hij werkzaam op het gebied van drogerijen, ovens, energie, milieu en automatisering.

Samevatting

Dit artikel geeft een overzicht van in werking zijnde rookgaswarmte-wisselaars in de Nederlandse grofkeramische industrie. Beschreven worden de warmtehuishouding, de samenstelling van rookgassen, regeneratieve en recuperatieve technieken met voorbeelden, warmteberekeningen en ervaringen.

Summary

This article surveys flue gas heat exchangers in use in the Dutch ceramics industry. Described are the energy balance, the composition of flue gases, regenerative and recuperative techniques with examples, calculations and experiences.

Warmtehuishouding

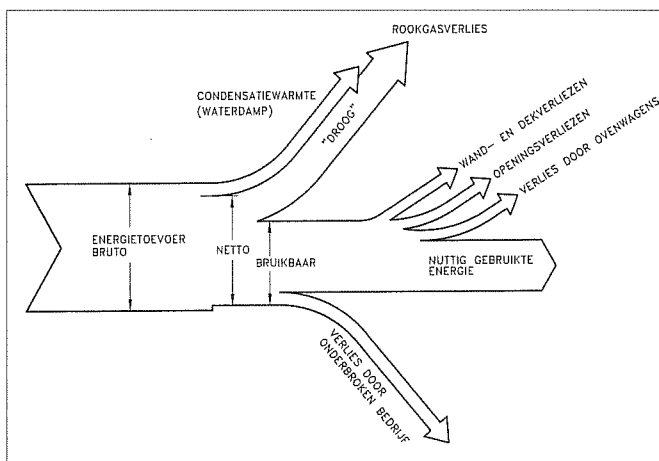
De grootste energieverliesposten in de warmtehuishouding van keramische bedrijven worden gevormd door de rookgassen van oven(s) en de uitlaatgassen van drogerijen. Het is logisch om deze verliezen als eerste te beperken in het streven energie te besparen. Dit artikel is gericht op de terugwinning van warmte uit rookgassen van ovens. Veel aspecten komen echter ook aan de orde bij de warmte terugwinning uit drogerij-afvoeren. Een probleem bij de warmte winning uit drogerijlucht is het relatief lage temperatuur niveau waarop de warmte vrijkomt, gemiddeld rond 50 °C. De inzetbaarheid in het productieproces is daardoor maar beperkt mogelijk. Een van de mogelijkheden om toch gebruik te maken van deze warmte is het gebruik van warmtepompen.

De toepassing op het gewenste temperatuurniveau staat echter nog in de kinderschoenen. Ook al gezien de hoge investeringen en het elektriciteitsverbruik. Om goed inzicht te krijgen in de mogelijkheden voor energierugwinning, en de inzet daarvan, wordt gebruik gemaakt van proces-integratiestudies op basis van de Pinch technologie. Als we de warmtehuishouding van een gebruikelijke tunneloven nader beschouwen, blijkt dat het rookgasverlies varieert tussen 10 en 25 % van het brandstofverbruik voor het stoken.

In figuur 1 is een voorbeeld van een energiebalans van een tunneloven weergegeven. Het rookgasverlies wordt bepaald door de hoeveelheid rookgassen en de rookgas-temperatuur. Van invloed op het rookgasverlies is de ovendimensionering, het productietempo, het product, de stapelwijze, de vuurvaste ondersteuning, de stookcurve en de ovenatmosfeer. In principe is de opwarmzone van de tunneloven een ideale tegenstroom warmte-wisselaar. Hiermee kan vrijwel zonder verliezen warmte worden overgedragen van de rookgassen direct op het product. Bovenstaande beïnvloedingsfactoren bepalen in welke mate de energie-inhoud van de rookgassen in de oven voldoende worden benut. Indien de verhoudingen niet (meer) optimaal zijn loopt de rookgashoeveelheid en/of de rookgas-temperatuur op. Dit probleem doet zich vaak voor, waar sprake is van outillage- en productie-aanpassingen ten opzichte van de ideale situatie. De meest voor de hand liggende oplossing is verlenging van de oven en/of herindelung van de zones in de oven.

Figuur 1:

■ Energiebalans van een tunneloven



Indien er geen rendabele mogelijkheden meer zijn om de rookgasverliezen met procesgeïntegreerde maatregelen te beperken, kan overgegaan worden tot de inzet van zogenaamde "end of pipe" maatregelen.

Om warmte uit rookgassen te kunnen gebruiken in andere delen van het proces bestaan er enkele nageschakelde technieken. Als eerste kan het directe gebruik genoemd worden in een ruimte voor de oven, voorwarmer, nadroger of zelfs in de drogerij.

Het praktische nadeel hiervan is in de meeste gevallen dat de kans bestaat op zichtbare aanslag van rookgas-componenten op de producten. Aangezien veel bouwkeramische materialen een grote esthetische waarde bezitten is dit ongewenst. Aangezien rookgassen uit keramische ovens zure bestanddelen bevatten, ontstaat corrosie aan stalen delen door condensatie, als de temperatuur lager wordt dan het zuurdauwpunt. Deze kritische temperatuur wordt in eerste instantie bepaald door het zwaveltrioxide (SO₃)-gehalte in de rookgassen. Op grond van de SO₃-concentratie kan het zuurdauwpunt worden berekend. Deze varieert meestal tussen 100 en 150 °C.

Samenstelling van rookgassen

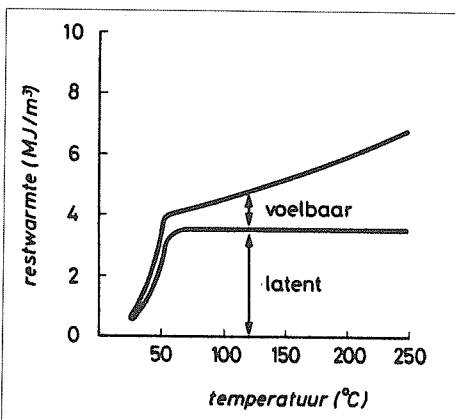
De samenstelling van de rookgassen van ovens voor keramische producten hangt af van veel parameters. Een overzicht van de rookgassamenstelling is weergegeven in tabel 1, als resultaat van een emissie-inventarisatie, die is uitgevoerd in de Nederlandse grof-keramische industrie [v. Wijck, Marks 1995].

Tabel 1:

■ De samenstelling van rookgassen in de nederlandse grofkeramische industrie

Component	Laagste meet-waarde ^d mg/m ³ _n	Hoogste meet-waarde ^d mg/m ³ _n	Gemiddeld per bedrijf ^e mg/m ³ _n	NER-grens-waarde ^b mg/m ³ _n	Totaal jaarlijkse uitstoot grofkeramische industrie (ton)
SO _x (als SO ₂)	2	917	71,5	200	842
NO _x (als NO ₂)	27	711	122	200	1.595
CO	7	1376	181	-	2.018
CO ₂	1,3 (vol%)	3,8 (vol%)	2,09 (vol%)	-	506.135
Stof	<1,4	135	ca. 13,5	10-50	ca. 125
Fluor (als HF)	0,4	150	40,7	5	419
Chloor (als HCl)	<1	80	ca. 10	30	ca. 140
Fluor stofgebonden (als HF)	<0,01	0,9	0,17	-	ca. 2

Naast de verschillende rookgascomponenten die vrijkomen bij het stoken van keramiek, komen ook waterdamp, stikstofoxiden, koolmonoxide en kooldioxide vrij bij de verbranding van aardgas. De restwarmte in verbrandingsgassen bestaat voor een deel uit voelbare warmte en voor een ander deel uit latente warmte. Voelbare warmte is



Figuur 2:

■ Restwarmte in rookgassen als functie van de temperatuur

warmte die vrijkomt bij temperatuurdaling. Latente warmte is de warmte die vrijkomt bij de condensatie van waterdamp, bij constante temperatuur.

In figuur 2 is de hoeveelheid restwarmte in rookgassen weergegeven als functie van de rookgastemperatuur, bij het stoken met aardgas met een beperkte luchtvermaat (10 %). Hieruit blijkt dat een aanzienlijk deel van de restwarmte uit latente warmte bestaat, die pas vrijkomt als de rookgassen beneden het dauwpunt worden afgekoeld (hier ca. 60 °C). Bij afkoeling tot 25 °C komt 3,54 MJ/ m³ aardgas beschikbaar. Bovenstaande calculaties gelden bijvoorbeeld bij het stoken van ketels. De luchtvermaat in ovens is echter veel hoger (soms meer dan 200 %), waardoor de beschikbare hoeveelheid restwarmte veel groter is. Een manier om deze warmte uit rookgassen terug te winnen is de toepassing van regeneratie- en recuperatietechnieken.

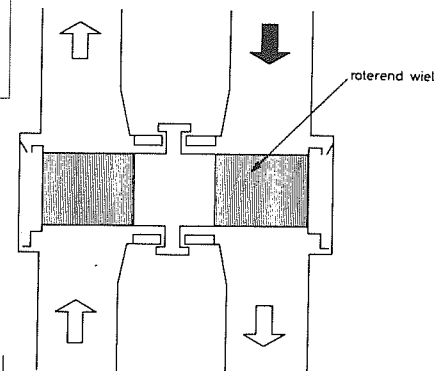
Regeneratieve techniek

Bij regeneratie wordt warmte via een tussenmedium overgebracht van het ene fluïdum naar de andere. Het tussenmedium wordt afwisselend opgewarmd en afgekoeld in het warme, respectievelijk koude fluïdum. Een klassiek voorbeeld is het gebruik achter glasovens. De regeneratoren,

met een volume dat vaak groter is dan van de glasoven zelf, zijn gevuld met hittebestandige stenen met een grote massa. Het systeem bestaat uit twee compartimenten, waardoor periodiek afwisselend rookgassen en verbrandingslucht stromen. De rookgassen staan warmte af aan de stenen, die na enige tijd weer afgestaan wordt aan verbrandingslucht.

Warmtewiel

Een bijzondere uitvoering van een regeneratieve techniek is het warmtewiel. Deze bestaat in hoofdzaak uit een grote poreuze schijf, die vervaardigd is van een materiaal met een redelijk hoge soortelijke warmte. Tussen twee aan elkaar grenzende leidingen draait deze schijf rond onder opname en afgifte van warmte. In figuur 3 is een principeschets opgenomen. Het wielmateriaal bestaat, afhankelijk van de toepassing, uit gevlochten metaaldraad, ge-



Figuur 3:

■ Principe warmtewiel

golde metaalplaat, keramisch materiaal of is gecoat met hygroscopisch materiaal. Omdat het wiel poreus is, neemt het gasen mee van de ene naar de andere leiding. Verontreiniging kan worden teruggedrongen door een spoelzone (dode sectie in de doorsnede) op te nemen. Er bestaat een automatisch reinigende werking door het afwisselen van de richting van de rookgassen en de lucht door dezelfde wielsectie. Tevens kunnen de wielen tijdens bedrijf gereinigd worden met perslucht of stoom.

In Nederland worden warmtewielen bij Waalsteenfabriek De Bylandt, Boral Doorwerth en Koramic Deest in de rookgassen van de ovens toegepast. De opgewarmde lucht wordt hierbij in de voorwarmer en de drogerij gebruik. Een punt van zorg hierbij is het voorkomen van corrosie en vervuiling. Vervuiling ontstaat door stof in de rookgassen, condensatie en/of sublimatie van rookgassen op de lamellen. In de praktijk blijkt dat de wielen periodiek moeten worden gestopt om te worden gereinigd. Voorkomen moet worden dat de stromingsweerstand te hoog oploopt en de warmteoverdracht verslechtert.

Afbeelding 1:

■ Warmtewiel bij Waalsteenfabriek De Bylandt

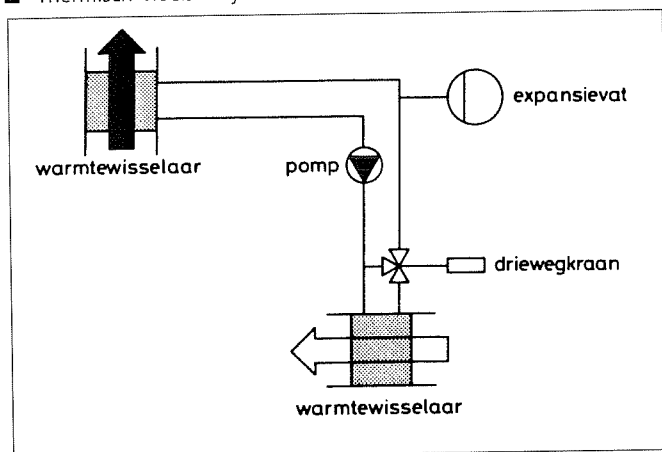


Thermisch vloeistofstelsel

Dit systeem bestaat uit twee warmtewisselaars, leidingen, een pomp en (eventueel) een expansievat. De eerste warmtewisselaar neemt warmte op uit de rookgassen en draagt deze over aan een vloeistof, meestal thermische olie. De opgewarmde vloeistof stroomt naar de tweede warmtewisselaar waar de warmte weer wordt afgestaan aan de koude luchtstroom. Een pomp zorgt voor circulatie in het vloeistofstelsel. In figuur 4 is een prinseschema van een thermisch vloeistofstelsel opgenomen. Het principe van het thermisch vloeistofstelsel biedt het voordeel dat de warmtewisselaars goed afgestemd kunnen worden op de afzonderlijke gasstromen, waarbij gemakkelijk een grote afstand kan worden overbrugd. Vermenging van gasstromen wordt vermeden. De gebruikstemperatuur kan tot 650 °C oplopen, de olie kan tot maximaal ca. 300 °C worden verwarmd. In de Nederlandse keramische industrie wordt dit systeem ingezet bij Steenfabriek Spijk, waarbij warmteoverdracht van lucht naar lucht plaatsvindt.

Figuur 4:

■ Thermisch vloeistofstelsel



Recuperatieve technieken

Onder recuperatie wordt verstaan dat de warmte van het ene fluidum op het andere wordt overgebracht door een vaste tussenwand. Voorbeelden hiervan zijn: Buizen- en platenwarmtewisselaars en recuperatieve branders.

Pijpenwarmtewisselaar

Een pijpenwarmtewisselaar is meestal een gas/vloeistof warmtewisselaar bestaande uit een pijpenbundel die vrijwel altijd voorzien is van ribben of lamellen. Vloeistof stroomt door de pijpen, terwijl de rookgassen eromheen worden geleid. Praktijkvoorbeelden daarvan in de keramische industrie zijn voedingswatervoorverwarmers of economisers voor stoomketels, warmtewisselaars voor gasmotorkoeling van warmte/kracht installaties. Bij de overdracht van warmte in een warmtewisselaar spelen drie termen een rol, namelijk: geleiding, overgang en straling. Meestal is er sprake van een combinatie, waarvan er één overheerst.

Geleiding

Voor geleiding door een buis geldt:

$$W = \frac{2 \lambda \pi r_m L}{r_u - r_i} (T_u - T_i)$$

waarin: r_m = logaritmisches gemiddelde straal van de buis
 L = lengte van de buis
 $r_u - r_i$ = dikte van de buiswand
 T_u, T_i = temperatuur van de buiswand aan de buiten- respectievelijk binnenkant
 λ = warmtegeleidingscoëfficiënt buiswand

De warmtedoorgang wordt verbeterd door de toepassing van materialen met een goede warmtegeleiding, beperking van de wanddikte, vergroting van de buisdiameter en de - lengte.

Overgang

De hoeveelheid warmte (W) die per tijdseenheid van een fluidum naar aan vast oppervlak wordt overgedragen, is uit te drukken in de volgende relatie:

$$W = \alpha A (T - T_w)$$

Waarin: α = warmte overdrachtscoëfficiënt
 T = temperatuur van het fluidum
 T_w = wandtemperatuur
 A = warmte wisselend oppervlak

De warmte-overdrachtscoëfficiënt (α) van vloeistoffen en bijvoorbeeld stoom naar een vast oppervlak is veel beter dan die van lucht of rookgassen (factor 50 tot 500).

De effectiviteit van de warmtewisselaar kan worden vergroot door de keuze van het fluidum, het bevorderen turbulentie en vergroting van het warmtewisselend oppervlak. De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt uiteindelijk bepaald door de inwendige- en uitwendige α , de materiaaldikte (d) en de warmtegeleiding van de wand (l)

Straling

De hoeveelheid straling die een stof uitzendt, is gelijk aan:

$$W = e \sigma A (T_{\text{pijp}} - T_{\text{omgeving}})^4$$

waarin: W = afgegeven stralingswarmte
 T = temperatuur van de stof
 A = oppervlak van de buis
 σ = stralingscoëfficiënt
 e = emissiecoëfficiënt

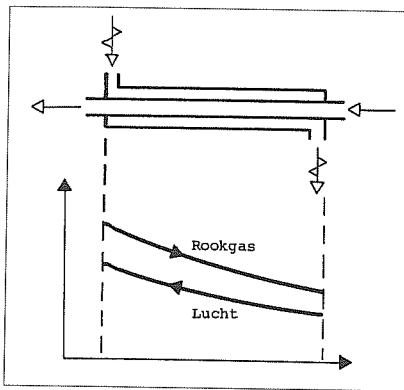
Het stralingsaandeel wordt sterk vergroot door het temperatuurverschil en daarnaast nog door het buisoppervlak, de materiaalsoort en de oppervlaktebehandeling.

Stromingstypen

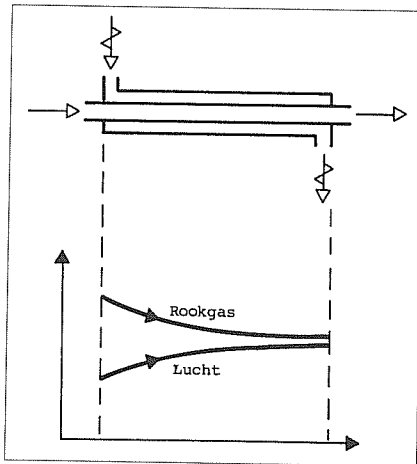
Het stromingstype is van invloed op de effectiviteit van de warmtewisselaar. In figuur 5 en 6 zijn de tegenstroom-warmtewisselaar en de meestroom- gelijkstroom- of parallel- stroomwarmtewisselaar weergegeven, met het daarbij behorend temperatuursverloop in de wisselaar. In de tegenstroomwisselaar stromen het koude en warme fluidum in tegengestelde richting. Dit principe is het meest gunstig omdat de warme vloeistof hier kan worden afgekoeld tot een temperatuur die lager is dan de uitlaat van het koude fluidum. Bij de parallelstroomwisselaar is de laagste temperatuur die bereikt kan worden gelijk aan de temperatuur van de uitlaat. Hoewel het tegenstroomprincipe leidt tot maximale warmte terugwinning wordt toch soms gekozen voor het ander type of combinaties daarvan in verband met compacte bouw of de vermijding van corrosie.

Condenserende warmtewisselaar

Een bijzonder type warmtewisselaar is de kunststof platen-wisselaar met inwendige cappilaren. In de KGK special "40 jaar TCKI", [v. Wijck, Marks 1997], is de toepassing beschreven als condenserende rookgasreiniger. De rookgassen van max. 150 °C worden in een viertal in serie geplaatste PVDF en polypropyleen warmtewisselaarmodulen met water gekoeld tot ca. 25 °C. Hierbij wordt zowel voelbare als latente warmte gewonnen uit rookgassen en het daarbij ontstane condensaat. Met het condensaat worden ook zure componenten uit de rookgassen onttrokken, waardoor de warmtewisselaars tevens als rookgasreiniger worden benut. In figuur 7 is een aanzicht weergegeven van de toegepaste kunststof warmtewisselaar.



Figuur 5:
 ■ Temperatuurverloop bij tegenstroom-warmtewisselaar

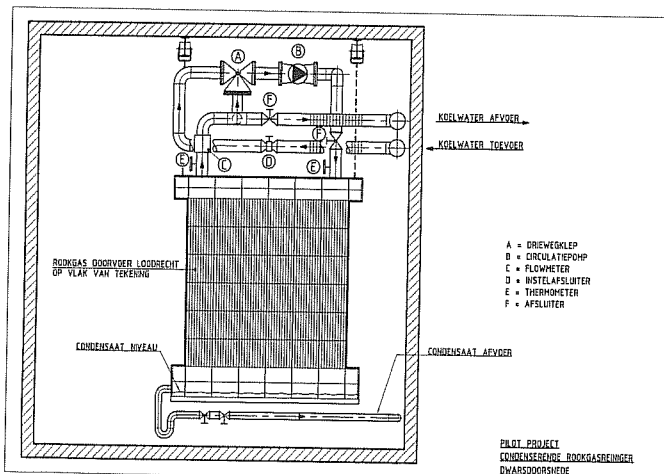


Figuur 6:
 ■ Temperatuurverloop bij meestroom-warmtewisselaar

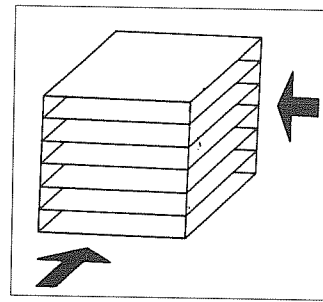
De gebruikte kunststoffen zijn zeer resistent tegen de agressieve rookgascomponenten die in het condensaat zijn opgenomen. De warmteweerstand van de wisselaars is gering door de mogelijkheid de wanddikte te beperken tot 0,1 à 0,2 mm. Dit type warmtewisselaars is toegepast in een pilotinstallatie, die is opgesteld bij Boral Huisman Milsbeek.

Platenwarmtewisselaars.

Platenwarmtewisselaars bestaan uit een frame waarop een aantal dunne metalen platen tegen elkaar zijn geklemd. Tussen de platen stromen gassen of vloeistoffen. Eventueel zorgt een ribbelstructuur voor een turbulente stroming, hetgeen de warmte-overdracht ten goede komt. De constructie is vrij eenvoudig. Het temperatuurbereik is meestal beperkt. Een uitvoeringsvorm is de kruisstroomwarmtewisselaar, waarbij de lucht of vloeistofrichting loodrecht op elkaar



Figuur 7:
 ■ Aanzicht van een condenserende kunststof warmtewisselaar



Figuur 8:
 ■ Kruisstroomwarmtewisselaar

staan. Dit type wordt vaak gebruikt in klimaatinstallaties, gezien de compacte bouwwijze. In figuur 8 is hiervan het principe weergegeven. De toepassing in rookgassen van keramische ovens is tot op heden mislukt.

Recuperatieve branders

Een bijzondere recuperatieve warmtewisselaar kan worden geïntegreerd in gasbranders. De brander is voorzien van een kleine verbrandingskamer, vervaardigd met keramisch materiaal of metaal. Rondom de brandermond bevindt zich een ringvormige opening die als inlaat fungeert voor de, uit de oven aangezogen, verbrandingsgassen. Aanzuiging kan plaatsvinden door een injecteur. In figuur 9 is een principe-schets van deze brander weergegeven. Een voordeel van deze brander is de compacte combinatie met een warmtewisselaar, met energiebesparingsmogelijkheden en verbeterde ovencirculatie. Als nadelen gelden het benodigde buizensysteem voor de afvoer van afgassen en de ontwikkeling van thermisch NO_x . In de Nederlandse Emissie Richtlijnen (NER) is de emissie hiervan gemaximaliseerd op 200 mg/m^3 , bij 18 % O_2 . Dit type branders kan meestal alleen zinvol worden toegepast in periodieke ovens. Inmiddels zijn er branders op de markt die het effect op de ovencirculatie overtreffen.

Hellmich rookgaswarmtewisselaar

Een bijzondere uitvoering is de kruisstroom warmtewisselaar, die gecombineerd is met het tegenstroom principe bij Steenfabriek Rijswaard in Aalst. In figuur 10 is een doorsnede weergegeven van deze warmtewisselaar, die in combinatie met de kalksplit rookgasreiniger is opgesteld. De rookgassen worden eerst door de kalksplitreactor geleid waarin de concentratie fluoriden, chloriden en zwaveltrioxide wordt gereduceerd. Het zwaveldioxidegehalte in de rookgassen blijft vrijwel ongewijzigd. Door vermindering van vooral het SO_3 -gehalte wordt het zuurdauwpunt verlaagd, waardoor het gevaar van condensatie en daarmee corrosie en vervuiling van de rookgasreiniger, de rookgaskanalen en de schoorsteen wordt beperkt.

De rookgassen uit de rookgasreiniger worden bovenin de warmtewisselaar toegevoerd. In tegenstelling tot de meeste warmtewisselaars is het geheel in standaard constructiestaal (St.37) gebouwd om de kosten te beperken. De rookgassen worden verticaal naar beneden langs rechthoekige buizen

Figuur 9:
 ■ Recuperatieve brander

