**CURSUS MILIEUTECHNOLOGIE**

**DEEL 2: AFVAL – THERMISCHE BEHANDELING**

Prof. Dr. Karl Vrancken

UA –Dept. Bio-ingenieur

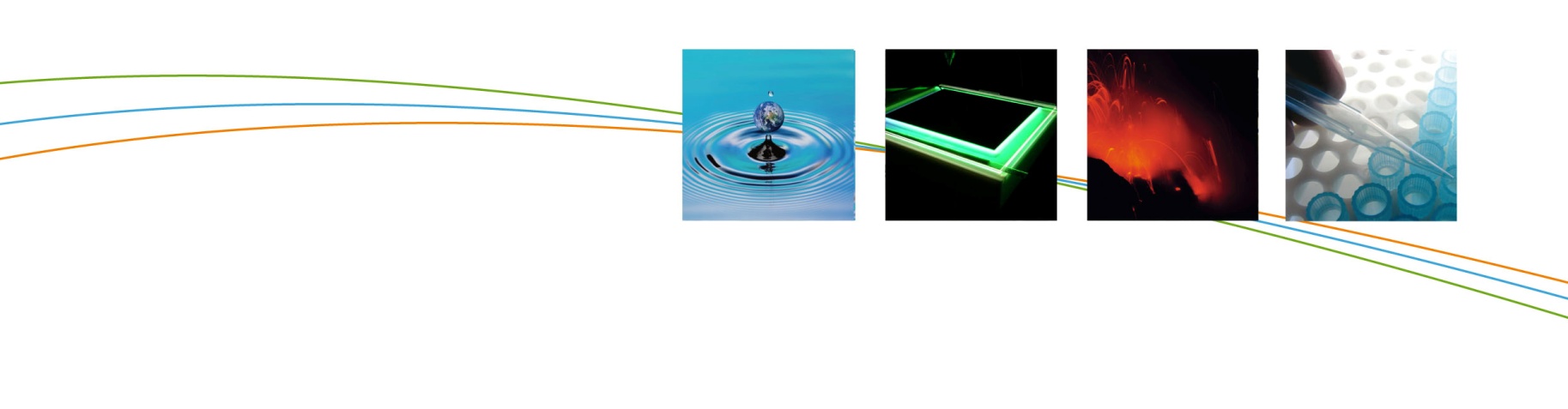
3BA- Milieutechnologie

Academiejaar 2011 - 2012

[Project report type]

[Title]

vranckek



Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV (“VITO”), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

Inhoud

[Inhoud I](#_Toc288128018)

[HOOFDSTUK 1. ROOSTEROVEN 1](#_Toc288128019)

[1.1. Procesbeschrijving 1](#_Toc288128020)

[1.2. Roostertype 2](#_Toc288128021)

[1.3. Koelingsystemen voor de roosters 2](#_Toc288128022)

[1.4. Terugwinning van energie 4](#_Toc288128023)

[1.4.1. Electriciteit-stoom-warmte 4](#_Toc288128024)

[1.4.2. Stoomproductie 4](#_Toc288128025)

[1.5. Naverbrandingskamer 4](#_Toc288128026)

[1.6. Stand van de techniek 8](#_Toc288128027)

[1.7. Referenties 8](#_Toc288128028)

[HOOFDSTUK 2. Wervelbedoven 9](#_Toc288128029)

[2.1. Procesbeschrijving 9](#_Toc288128030)

[2.1.1. Principe 9](#_Toc288128031)

[2.2. Procescondities 9](#_Toc288128032)

[2.3. Varianten 9](#_Toc288128033)

[2.3.1. BFB: 9](#_Toc288128034)

[2.3.2. CFB: 10](#_Toc288128035)

[2.3.3. RBF: 10](#_Toc288128036)

[2.4. Stand van de techniek 11](#_Toc288128037)

[2.5. Acceptatiecriteria 11](#_Toc288128038)

[2.6. Basisstoffen/hulpstoffen 11](#_Toc288128039)

[2.7. Eindproduct 11](#_Toc288128040)

[2.8. Emissies 12](#_Toc288128041)

[2.8.1. Afvalwater 12](#_Toc288128042)

[2.8.2. Afval 12](#_Toc288128043)

[2.8.3. Luchtemissies 12](#_Toc288128044)

[2.9. Referenties 13](#_Toc288128045)

[HOOFDSTUK 3. Pyrolyse 14](#_Toc288128046)

[3.1. Procesbeschrijving 14](#_Toc288128047)

[3.1.1. Principe 14](#_Toc288128048)

[3.1.2. Procesverloop 14](#_Toc288128049)

[3.2. Varianten 15](#_Toc288128050)

[3.2.1. Enkelvoudig of geïntegreerd proces 15](#_Toc288128051)

[3.2.2. Verblijftijd en warmtetoevoer 15](#_Toc288128052)

[3.2.3. Reactortype en warmtetoevoer 15](#_Toc288128053)

[3.3. Stand van de techniek 16](#_Toc288128054)

[3.4. Acceptatiecriteria 16](#_Toc288128055)

[3.5. Basisstoffen/hulpstoffen 17](#_Toc288128056)

[3.6. Eindproduct 17](#_Toc288128057)

[3.7. Emissies 18](#_Toc288128058)

[3.7.1. Afvalwater 18](#_Toc288128059)

[3.7.2. Luchtemissies 18](#_Toc288128060)

[3.7.3. Afval 18](#_Toc288128061)

[3.8. Referenties 18](#_Toc288128062)

# ROOSTEROVEN

## Procesbeschrijving

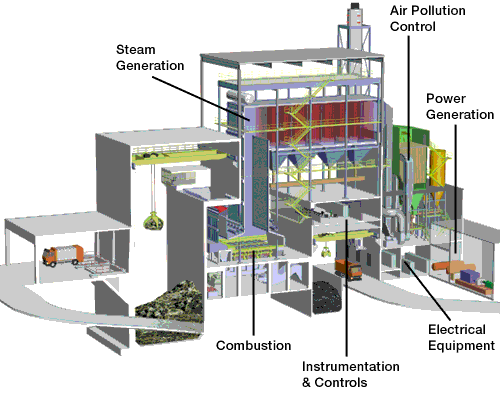
Het afval wordt via een voedingstrechter in de oven gebracht. Het wordt door een operator gehomogeniseerd en met een afvalkraan in de voedingstrechter gebracht. Het afval dat in de voedingstrechter aanwezig is, sluit de oven luchtdicht af en zorgt er voor dat deze op onderdruk wordt gehouden. Op deze manier wordt vlamterugslag voorkomen. Er is een kleppensysteem aanwezig, maar dit wordt enkel gebruikt bij het opwarmen van de oven tijdens de opstartfase en in noodsituaties.

Onderaan de voedingstrechter wordt het afval op een hydraulisch aangedreven voedingsrooster gebracht, welke het afval op het eigenlijke verbrandingsrooster brengt. De snelheid kan worden aangepast waardoor de doorzet gecontroleerd kan worden.

Het eigenlijke verbrandingsproces voltrekt zich boven het rooster en kan opgesplitst worden in vier subprocessen. In eerste instantie wordt het afval gedroogd. In de volgende fase vindt de vergassing plaats: vervluchtigde koolwaterstoffen ontsnappen uit het afval. In de derde fase, de verbrandingsfase ontvlammen deze substanties en worden ze geoxideerd tot hoofdzakelijk CO2 en water. Op het einde van het rooster tenslotte branden de laatste resten van de overgebleven vaste koolstof uit. Het verbrandingsrooster zorgt voor het transport van de vaste stoffen door de oven en voor de opmenging ervan.

Onder het rooster zijn trechters opgesteld voor de opvang van de roosterdoorval, en voor de toevoer van de primaire verbrandingslucht. Deze luchttoevoer wordt gestuurd aan de hand van temperatuursmetingen boven het rooster. Er wordt getracht een compromis te vinden tussen een goede uitbrand en een daling van de rookgastemperatuur door te sterke verdunning. De rookgassen worden door een naverbrandingskamer gevoerd waar secundaire verbrandingslucht wordt toegevoerd.

De warmte uit de rookgassen wordt gerecupereerd door middel van een stoomketel. De thermische energie van de rookgassen wordt gebruikt om oververhitte stoom van 40 bar en 400 °C te produceren. De stoomketel bestaat uit een groot aantal buizen welke gevuld zijn met water. De rookgassen worden doorheen de stoomketel geleid waardoor het ketelwater opwarmt. In de eerst verticale lege trek van de ketel die geïntegreerd is in de ovenwand, gebeurt de warmte-overdracht door straling. In het tweede gedeelte zijn economizers, verdampers en oververhitters opgesteld, die de warmte van de rookgassen convectief opnemen. In de economizer wordt het water opgewarmd door de gassen tot ongeveer het kookpunt, in de verdamper wordt het water afkomstig van de economizer verder verwarmd tot verzadigde stoom wordt gevormd. Daarna wordt in de oververhitter de verzadigde stoom verder verwarmd tot oververhitte stoom (standaard 400 °C en 40 bar).

****

Figuur : Schema roosteroven.

## Roostertypen

Er werden verschillende typen van verbrandingsroosters ontwikkeld:

Hellend rooster: bij het hellend rooster kunnen twee typen worden onderscheiden : het eerste type is licht hellend opgesteld (15 – 30°) met tegels die in de voortgangsrichting bewegen (Noell, Von Roll, Keppel Seghers,..). Bij het tweede type rooster bewegen de tegels tegen de voortgangsrichting in. Hierdoor bekomt men een goede terugmenging van de brandende massa. Om het transport van de vaste fractie door de oven mogelijk te maken wordt gebruik gemaakt van een sterke roosterhelling welke de tegengestelde beweging van de tegels moet compenseren. (Martin)

Walsenrooster: Het rooster wordt eveneens hellend uitgevoerd, maar in plaats van bewegende tegels te gebruiken, wordt gebruik gemaakt van geperforeerde cilinders die in de voorgangsrichting draaien. (Babcock)

Horizontaal rooster: het rooster wordt horizontaal opgesteld. De beweging van de roostertegels zorgt voor het transport van de vaste massa. (ABB)

## Koelingsystemen voor de roosters

Luchtgekoelde roosters: luchtgekoelde roosters zijn tot recentelijk de standaard technologie voor roosterovens. Hoewel deze systemen zeer betrouwbaar zijn in de praktijk en de kostprijs vrij voordelig is, werden onder bepaalde omstandigheden volgende minpunten vastgesteld:

* Veranderingen in de gemiddelde afvalsamenstelling in bepaalde landen/regio's tijdens de laatste jaren hebben geleid tot een hogere gemiddelde verbrandingswaarde van het te verbranden afval. Hierdoor vertonen de luchtgekoelde roosters een snellere slijtage, hetgeen leidt tot verhoogde operationele kosten.
* Het grootste nadeel van luchtgekoelde roosters is dat de primaire lucht zowel gebruikt wordt als verbrandingslucht als voor de koeling van het rooster. Beide functies kunnen niet ontkoppeld worden.
* Omdat een deel van de primaire verbrandingslucht gebruikt moet worden als koelmiddel, kan deze niet optimaal gebruikt worden voor het verbrandingsproces.

Watergekoelde roosters: Om tegemoet te komen aan bovenvermelde minpunten, eigen aan luchtgekoelde roosters, werden de watergekoelde roosters ontwikkeld Bij het toepassen van watergekoelde roosters, kan de hoeveelheid lucht gereduceerd worden. Dit biedt voordelen voor de reductie van primaire NOx-productie. Ook de thermische belasting van het rooster kan stijgen. Bovendien wordt de oventemperatuur gereduceerd door het onttrekken van warmte aan de oven. Een nadeel van watergekoelde rooster is dat het systeem complexer wordt met mogelijke problemen naar beschikbaarheid van het systeem. Het waterkoelsysteem is geïntegreerd in het luchtvoorverwarmsysteem zodat de warmte gerecupereerd kan worden. Een voorbeeld van een watergekoeld rooster is de Aquaroll (Von Rolliv). Om te kunnen werken met watergekoelde roosters, wordt het ganse systeem onder druk gezet worden, zodat temperaturen boven 100 °C behaald kunnen worden zonder dat er zich verdamping voordoet. Het koelwater bereikt de individuele roosterblokken langs onder via een systeem van toevoerleidingen en zorgt voor de afkoeling van het roosteroppervlak. Hierna wordt het water afgeleid naar een warmtewisselaar, waar het afkoelt. Op deze manier kan de opgenomen warmte gerecupereerd worden en ingezet worden in de energiecyclus van het verbrandingssysteem. Voordelen zijn een lagere operationele kost tengevolge van een tragere slijtage van de roosters. De verbranding van het afval zou wel optimaal kunnen verlopen en de uitbranding van het afval zou completer gebeuren. De Aquaroll watergekoelde roosterovens worden reeds toegepast in de nieuwe roosteroven van het Duitse Nürnberg, die in 2001 werd gebouwd. Ook in Nederland werden roosterovens uitgerust met watergekoelde roosters om afval met een hogere verbrandingswaarde te kunnen verwerken (o.a. AVI Amsterdam).

****

Figuur : lucht- en watergekoelde rooster systemen

## Terugwinning van energie

### Electriciteit-stoom-warmte

In traditionele roosterovens werd enkel aan energierecuperatie gedaan in de vorm van elektriciteit.

De verbranding in een roosteroven moet aan de ene kant verlopen met een voldoende O2-overmaat, omdat bij deze condities een goede verbranding verzekerd is. Deze O2-overmaat in de rookgassen neemt echter een deel van de energie weg, waardoor een lager energieconversierendement behaald wordt dan in geval van industriële stoomketels. Deze laatste werken gemiddeld bij een O2-gehalte van 0,5 %.

Ook bepaalde rookgaszuiveringsstappen hebben energie nodig en zorgen voor een verlaging van het energierendement. Een goed voorbeeld is de natte gaswassing. Tenslotte heeft een afvalverbrandingsinstallatie een hoger stralingswarmteverlies dan een klassieke stoomketel. Wanneer een combinatie wordt gemaakt van energierecuperatie in de vorm van elektriciteit en in de vorm van warmte (stoom), kan het energieconversierendement op significante wijze verhoogd worden.

### Stoomproductie

Een klassieke roosteroven produceert stoom aan 400°C en 44 bar. Een hoger energieconversierendement zou kunnen behaald worden wanneer stoom aan hogere temperatuur en druk zou geproduceerd worden met behulp van de rookgassen. Hiervoor is het nodig om de boiler uit te rusten met nieuwe corrosiebestendige materialen. Standaard wordt er hiervoor gebruik gemaakt van keramische materialen zoals Al2O3, SiO2, SiC, … in verschillende mengelingen, combinaties en bindingen.

Naast chemische bescherming is ook thermische isolatie een belangrijk onderdeel. Door het variëren van de thermische geleidingscoëfficiënt of the dikte van het materiaal kan de warmte overdracht van de oven gecontroleerd worden.

De temperatuur in de oven bepaalt de primaire productie van CO, CxHy, NOx en dioxines/furanen. Langs de andere kant is de verblijftijd in de naverbrandingskamer zeer afhankelijk van de behaalde temperatuur (zie Tabel 1). De materiaalkeuze speelt dus een belangrijke rol in het proces.



Tabel : verblijftijden in naverbrandingszone in functie van de temperatuur

## Naverbrandingskamer

De ingang van de naverbrandingskamer bevindt zich boven het verbrandingsrooster. Deze kan zich positioneren aan het begin, het midden of einde van het rooster.

Meestroom verbrandingskamer *(parallel flow)*: Voordeel van dit type verbrandingskamer is dat de rookgassen een lange verblijftijd hebben in de verbrandingskamer en dat ze door de zone met maximale temperatuur moeten. Om ontbranding te vergemakkelijken moet de primaire lucht voorverwarmd worden bij de verbranding van afval met lage verbrandingswaarden.

Tegenstroom verbrandingskamer *(counter flow)* : Wanneer de ingang zich in het begin van het rooster bevindt bewegen de rookgassen zich in tegenstroom met de brandende massa. De verbranding van afval met lagere verbrandingswaarden kan beter beheerst worden bij dit type naverbrandingskamer. De hete gassen vergemakkelijken het drogen en de ontbranding van het afval wanneer ze boven het rooster worden teruggevoerd. Er dient te worden voorkomen dat onverbrande gasstromen de installatie verlaten. Als regel geldt dat er meer secundaire verbrandingslucht dient te worden toegevoegd bij dit type naverbranindingskamer.

Middenstoom verbrandingskamer (*centre flow)*: Dit type installatie is een compromis tussen het meestroom en tegenstroommodel. In dit type installaties kunnen stromen met een brede range van calorische waarde verwerkt worden.



Figuur : verschillende typen naverbrandingskamers

In onderstaande figuur (Figuur 4) wordt de verticale temperatuurverdeling voor verschillende typen naverbrandingskamers weergegeven. Deze simulatie is gebaseerd op een wiskundig model dat werd gevalideerd met data van bestaande installaties. Deze illustratie kan niet geïnterpreteerd worden als zijnde een absoluut resultaat maar eerder om de karakteristieken van de verschillende systemen weer te geven. De zuurstofverdeling in de inlaat en naverbrandingskamer is eveneens functie van het warmtetransferprofiel langsheen het rooster en hierdoor ook functie van de afvalkwaliteit.



Figuur : verticale temperatuursverdeling voor de verschillende typen naverbrandingskamers

Naast het type naverbrandingskamer heeft ook het type bekleding van de wanden (zie Figuur 5) in de naverbrandingskamer een invloed of de temperatuursverdeling in de rookgassen. Dit is een direct gevolg van de warmtegeleidingscapaciteit van het materiaal. Hoe lager de geleidingscoëfficiënt van het materiaal, hoe hoger de temperatuur van de rookgassen in de naverbrandingskamer.



Figuur : verticale temperatuursverdeling voor verschillende typen wandbekleding en secundaire lucht injectie

Door het opsplitsen van de totale hoeveelheid verbrandingslucht (met een overstoechiometrische hoeveelheid van 1,3 tot 1,8) in primaire lucht en secundaire lucht kunnen de verbrandingscondities in de verbrandingsoven zo gecontroleerd worden dat er ‘bijna’-stoechiometrische condities ontstaan. De verdeelratio tussen primaire en secundaire lucht bevindt zich tussen 80/20 (oude installaties) en 40/60 (tendens voor nieuwe installaties). Secundaire lucht wordt toegevoegd om volledige verbranding te verkrijgen van de koolwaterstoffen en koolmonoxide. Bovendien kan de secundaire lucht gebruikt worden als menginstrument voor de rookgassen. Afhankelijk van overige eigenschappen van de oven, kan de plaatsing van de secundaire-luchtinjectors geoptimaliseerd worden.

Secundaire lucht wordt typisch geïnjecteerd in het overgangsgebied tussen de oven en de eerste trek van de ketel. Het aantal injectors, de diameter, afstanden tussen injectors en horizontale en/of verticale helling kunnen worden aangepast. Nieuwe ontwikkeling is het tangentiele plaatsen van de injectors.



Figuur : verschillende mogelijkheden voor secundaire lucht injectie

Momenteel worden methoden ontwikkeld/gebruikt om de secundaire lucht injectie te

verbeteren. Volgende methoden zijn worden momenteel reeds toegepast:

* Roterende cilinder (met bijkomende secundaire lucht injectors)
* Vaste prisma’s (met bijkomende secundaire lucht injectors)
* Stoom injectie (in plaats van secundaire lucht injectie)

De roterende cilinder zorgt voor problemen bij de constructie en gebruik. Het prisma wordt gebruikt in een verbrandingsinstallatie voor huishoudelijk af val in Bonn (Duitsland)[ref] en vertoont goede resultaten zoals een betere uitbrand van koolwaterstoffen en CO. De vervuiling gedurende de radiale en convectieve warmteoverdracht in de ketel blijkt lager te zijn. Stoominjectie in de plaats van secundaire lucht injectie verhoogt de menging en hierdoor ook de uitbrand, maar de werkingskost is hoger. Hieruit kunnen we besluiten dat het prisma het meeste potentieel heeft voor grotere installaties met brede overgangen tussen oven en naverbrandingskamer. Figuur 7 geeft een overzicht van de verschillende besproken systemen.



Figuur : Verschillende systemen voor secundaire lucht injectie

Onderstaande figuur geeft de resultaten van de simulatie weer voor verschillende typen van secundaire lucht injectie. Bij het standaard systeem (normal geometry) zien we een slechte verdeling van zuurstof bij de ingang van de naverbrandingskamer. Het prisma werkt als een statisch menginstrument en verhoogt hierdoor de mening. Ook de tangentiele injectie leidt tot een betere menging.

**

Figuur : verticale zuurstofverdeling voor verschillende luchtinjectiesystemen (middenstroom naverbrandingskamer)

Het type naverbrandingskamer (al dan niet gecombineerd met het type secundaire lucht injectie) heeft eveneens invloed op de verdeling van CO in de rookgassen. Bij de reductie van CO met secundaire lucht injectie is gerelateerd aan het type injectiesysteem dat gebruikt wordt. Over het algemeen kan men stellen dat een snelle reductie bekomen kan worden door het gebruik van een tegenstroom naverbrandingskamer of middenstroom naverbrandings-kamer met prisma.

## Stand van de techniek

De roosteroven was de voorbije 100 jaar de standaard technologie voor de verbranding van vast afval. Deze techniek wordt wereldwijd gebruikt voor de verbranding van huishoudelijk en niet gevaarlijk bedrijfsafval. De voorbije en komende jaren zijn er verschillende technologische ontwikkelingen die de performantie op gebied van milieu en energie hebben verbeterd en zullen verbeteren. Aan de andere kant zullen bepaalde ontwikkelingen ook een invloed kunnen hebben op de kosten van de verwerking van afval in een roosteroven.

Binnen Europa wordt de verbrandingscapaciteit van de roosterovens nog sterk uitgebreid als een gevolg van de implementatie van de Europese Richtlijn 1999/31/EG betreffende het storten van afvalstoffen en omwille van het feit dat het een bewezen techniek betreft die reeds een lange ontwikkelingsweg achter de rug heeft.

## Referenties

1. Jacobs A., Wellens B., Dijkmans R. (2003). Gids afvalverwerkingstechnieken, Uitgave 2, Academia Press, Gent.
2. Göerner,K (2003) Waste Incineration European State of the Art and New Developments, University of Essen, Germany
3. Brem G. (2003. Advanced waste incineration concepts, TNO-MEP, Nederland.
4. http://www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/vri\_aquaroll\_d.pdf
5. Indaver (2003). Indaver, naar een duurzaam afvalbeheer: Infosessie roosteroven doel; 25/11/2003.

# Wervelbedoven

## Procesbeschrijving

### Principe

Wervelbedovens steunen op het inblazen van een luchtstroom door een laag zand, zodanig dat het zand wordt opgewerveld. De snelheid van de luchttoevoer wordt zodanig hoog gekozen, dat het zand zich niet meer als een vaste stof maar als een fluïdum gedraagt.

Het afval wordt bovenaan het wervelbed toegevoerd. Het ondergaat door de turbulentie een intensieve menging met het zand, waarbij een goede warmteoverdracht plaatsgrijpt. De organische fractie van het afval vergast hierdoor en ontbrandt. Vliegassen worden met de rookgassen meegevoerd. Bodemassen bezinken in het bed en worden door continue of discontinue zeving uit het zand verwijderd. De efficiënte warmteoverdracht die in het wervelbed plaatsvindt, resulteert in een goede uitbrand.

Boven het wervelbed wordt secundaire lucht ingeblazen. De rookgassen worden via de naverbrandingskamer naar de stoomketel gevoerd.

## Procescondities

De temperatuur in het wervelbed bedraagt typisch 800 – 900 °C. Hogere waarden zijn niet mogelijk, door het risico op sinteren en smelten van het zand. De snelheid van de luchtstroom die doorheen het zandbed wordt gejaagd ligt tussen 2 en 5 m/s. De retentietijd in de verbrandingszone bedraagt > 2s. De stoomketel werkt typisch op een temperatuur van 400 of 500°C en een maximale druk van 5 of 7 - 9 MPa, afhankelijk van het wervelbedtype.

In principe is een wervelbed een goed te sturen reactor, met een snelle responstijd. Dit maakt een nauwkeurige regeling van de temperatuur en een stabiele thermische werking mogelijk. Hierdoor is een wervelbed geschikt voor de verbranding van mengsels van afvalstoffen, zowel voor combinaties van vaste en vloeibare stromen als hoog-calorische en laag-calorische stromen.

## Varianten

Drie types van wervelbedovens kunnen onderscheiden worden:

* BFB : Bubbling Fluidised Bed
* CFB : Circulating Fluidised Bed
* RFB : Rotating Fluidised Bed

### BFB:

Een BFB heeft een toevoersnelheid die juist voldoende is voor fluïdisatie van het zandbed. Het zandbed krijgt hierdoor het uitzicht van een kokende vloeistof. Het betreft een oude en beproefde techniek. Deze wordt hoofdzakelijk voor verbranding van RWZI-slib (na mechanische ontwatering) en steenkool ingezet. De techniek is ook geschikt voor de verbranding van onbehandeld hout. De calorische waarde van de input dient lager te zijn dan 14 GJ/ton. Voor monostromen kan deze bovengrens opgedreven worden tot 20 GJ/ton.

### CFB:

Bij een CFB wordt de toevoersnelheid van de verbrandingslucht zodanig opgedreven, dat een deel van het zand continu aan de bovenzijde van de oven wordt afgevoerd. Een CFB is een smalle constructie, waardoor het zandbed een grote stofwolk vormt. Het afgevoerde zand wordt afgescheiden in een cycloon. Het zand wordt na uitzeving van de ongewenste delen terug naar de bodem van de oven gerecirculeerd.

De CFB-techniek is afkomstig uit de energiesector (biomassa-centrales) en de papierindustrie (pulpverbranding) en wordt veelvuldig gebruikt. De configuratie laat door sturing van de dichtheid van de zandwolk een grote warmte-afvoer toe, waardoor een CFB bijzonder geschikt is voor de verbranding van relatief hoog-calorische mengsels of monostromen (tot 30 GJ/ton).

**

*Figuur 1: Circulerend wervelbed*

### RBF:

In een RFB wordt het wervelende zand door een gerichte, hogere toevoer van lucht in bepaalde zones onder het zandbed omgegooid. De primaire luchtinvoer is met andere woorden ongelijk verdeeld over de doorsnede van het bed. Naast het kokend gedrag van het zand wordt hierdoor eveneens een circulatie in het gehele zandbed veroorzaakt. Het zand wordt van het midden naar de zijkant geworpen. Een deel van het zand wordt continu afgevoerd en kan na behandeling (metaalafscheiding, zeven) terug naar de oven worden gestuurd.

Het RFB is als alternatief voor de roosteroven, voor de verbranding van huishoudelijk afval, ontwikkeld. De techniek is bruikbaar met een beperkte voorbehandeling. De calorische waarde van de input dient beperkt te worden tot ongeveer 14 GJ/ton.

## Stand van de techniek

Wervelbedovens worden reeds tientallen jaren gebruikt, onder andere voor de verbranding van steenkool ... Recenter vond deze verbrandingstechniek opgang voor de verwerking van afvalstromen met hoog watergehalte, zoals waterzuiveringsslib (na mechanische ontwatering).

In Vlaanderen worden momenteel 1 wervelbedovens (BFB-type) met beperkte capaciteit geëxploiteerd, voor de verbranding van waterzuiveringsslib (RWZI Brugge). Indaver exploiteert een CFB-installatie, voor de co-verbranding van waterzuiveringsslib en hoogcalorische afvalstoffen, waaronder de hoog-calorische restfractie van huisvuil.

## Acceptatiecriteria

Een wervelbedoven is geschikt voor de verbranding van vaste afvalstoffen en afvalstoffen met hoog watergehalte (slibs, ...). Door menging met vaste afvalstoffen kunnen ook vloeistoffen verwerkt worden.

De thermische capaciteit van een wervelbedoven ligt hoger dan een klassieke roosteroven. Een CFB heeft het breedste werkingsgebied. De calorische waarde van de input kan 6 tot 30 GJ/ton bedragen. Zowel een CFB als een RFB zijn uitstekend geschikt voor de verbranding van brandstoffenmengsels.

Knelpunten vormen metalen met een laag smeltpunt (Al, Sn, Pb) en componenten die het smeltpunt van het zand verlagen. Deze worden bij voorkeur in de input beperkt.

Gezien het werkingsprincipe vergt de techniek voorbehandeling:

Vaste stoffen: ontschroting, verkleining tot < 10 cm (< 30 cm voor een RFB);

Slibs: mechanische ontwatering.

## Basisstoffen/hulpstoffen

Voor een verbranding in de wervelbedoven zijn volgende procesmaterialen

noodzakelijk:

Zand als fluidisatie-medium.

Andere hulpstoffen zijn gerelateerd aan de rookgaszuivering:

Kalk;

Water;

...

## Eindproduct

De eindproducten van het verbrandingsproces zijn:

* Rookgassen;
* Residuen: bodemassen en vliegassen
* Gerecupereerde verbrandingswarmte.

De bodemassen en vliegassen bevatten het grootste deel van de anorganische fractie (inerten en metalen) die in de voeding aanwezig is. De hoeveelheid hangt af van de asrest van de voeding (laag voor hout, sterk variërend voor kunststoffen). Voor huishoudelijk afval bedraagt de asrest typisch 25 – 35%.

Door de hoge gassnelheid, vooral in een CFB, is in vergelijking met verbranding in een roosteroven de hoeveelheid bodemassen lager en vliegassen daarentegen hoger. Bij verwerking in een CFB kan het aandeel van beide fracties ongeveer gelijk zijn.

## Emissies

### Afvalwater

Afvalwater kan ontstaan bij de zuivering van de rookgassen. De hoeveelheid en de kwaliteit hangt af van de gebruikte zuiveringstechnieken. Vaak is het mogelijk het afvalwater te hergebruiken in het zuiveringsproces, waardoor de installatie lozingsvrij kan functioneren.

### Afval

De verbranding genereert residu’s:

Vliegassen en bodemassen;

Residu van de rookgasreiniging.

De hoeveelheid residu hangt af van de asrest van de voeding.

### Luchtemissies

De verbranding genereert rookgassen. De karakteristieken zijn sterk afhankelijk van de verwerkte afvalstof. Algemeen kan gesteld worden dat de stabiele thermische werking en de goede menging van de brandstof en de luchttoevoer die wervelbedverbranding kenmerkt, resulteert in relatief lage concentraties aan NOx, CO en CxHy. Bij de verbranding van afvalstoffen met een beperkt stikstofgehalte ligt de NOx-emissie in principe lager dan 200 mg/Nm³. In recente literatuur wordt wel gewezen op de emissie van N2O. Daarnaast kan ook de emissie van stof, en daaraan gekoppeld de concentratie aan metalen, relatief hoog zijn.

In 2 studies, uitgevoerd door het Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie [4, 5], worden de emissies van de **ruwe rookgassen** (enkel primaire ontstoffing voor de stoomketel) voor de verbranding van een aantal restfracties in een circulerend wervelbed berekend.



Uit deze tabel blijkt duidelijk het effect van het stikstofgehalte van de voeding (hoog voor hout en laag voor kunststofafval en papier) op de concentratie aan NOx.

## Referenties

1. Environmental Technology Monographs. Handbook, Envi Tech Consult;
2. GOM-Antwerpen: www.gomantwerpen.be/nederlands/publicaties/milieu/voorstelling.html.
3. Cleiren D., GOM-Antwerpen (2000). Objectieve keuze inzake verwerkingstechnieken. Het objectiveren van de techniekkeuze voor de eindverwijdering van huishoudelijk afval: het praktijkvoorbeeld binnen de provincie Antwerpen. 20ste Internationaal Seminarie – Het Beheer van Afvalstoffen. Vrije Universiteit Brussel in samenwerking met RDC, 11-12 mei 2000;
4. Emissies uit bijstoken, verbranden en vergassen van niet-gevaarlijke afvalstromen (in vergelijking tot BLA en AVI), Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie, www.cedelft.nl, 2000;
5. Beperking van emissies naar lucht bij conversie van biomassa naar elektriciteit en warmte, Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie, [www.cedelft.nl](http://www.cedelft.nl), 1999.

# Pyrolyse

## Procesbeschrijving

### Principe

Onder pyrolyse wordt het thermisch ontleden van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof verstaan. Volgende figuur situeert pyrolyse ten opzichte van vergassing en verbranding, in functie van de luchttoevoer:

**

*Figuur 1: Overzicht van de verschillende vormen van thermische conversie*

In de praktijk wordt pyrolyse uitgevoerd bij temperaturen tussen 450 en 750°C. Bij deze temperaturen ontleden hogere koolwaterstoffen tot componenten met lagere molecuulmassa. Hierbij ontstaan verschillende fracties:

Gas: bestaande uit een condenseerbare (water en oliën) en een niet condenseerbare fractie;

Pyrolysecokes.

Het is duidelijk dat pyrolyse niet als verwerkingstechniek, maar eerder als voorbehandeling gezien moet worden. De uitvoering van pyrolyse als voorbehandeling biedt onder meer volgende voordelen [4]:

Het afval wordt omgezet in meer homogene fracties, wat de verdere verwerking vergemakkelijkt. Het homogene karakter laat bijvoorbeeld een beter controleerbare verbranding toe. Eventueel kunnen de fracties nog gezuiverd worden;

Pyrolyse wordt uitgevoerd bij relatief lage temperaturen, in een reducerende atmosfeer. Hierdoor concentreren de meeste metalen in niet-geoxideerde vorm in de cokes. Dit laat toe om ze in relatief zuivere vorm gedeeltelijk uit de cokes te verwijderen, voor deze verdere verwerking ondergaan;

De procescondities zijn zodanig dat uit de aanwezige chloor weinig dioxines gevormd worden [4]. Chloride kan door wassing uit de cokes verwijderd worden.

### Procesverloop

Het pyrolyseproces kan in volgende processtappen worden opgedeeld:

Toevoer van het afval: na verkleining;

Warmtetoevoer: de overdracht van warmte kan op verschillende manieren gebeuren:

* + partiële verbranding (met een ondermaat lucht) van het toegevoerde afval;
  + directe verwarming door toevoer van inerte gassen met een hoge temperatuur;
  + indirecte verwarming door warmtetoevoer via verwarmingspijpen of de wanden van de installatie.

Ontleding: de organische verbindingen in de input ontbinden door de energietoevoer in componenten met lagere molecuulmassa;

Scheiding ontledingsproducten: bij verhoogde temperatuur bestaan de ontledingsproducten uit vaste stoffen (cokes) en gassen. De gasfase kan door koeling gescheiden worden in een condenseerbare fractie (oliën, water) en een niet condenseerbare fractie (gas). De scheidingsprocessen kunnen vervangen of aangevuld worden door verdere thermische verwerking, zoals bijvoorbeeld kraken.

## Varianten

Diverse pyrolysetechnieken zijn beschikbaar, voor batchgewijze of continue verwerking.

### Enkelvoudig of geïntegreerd proces

Bij een enkelvoudig pyrolyseproces worden de cokes off-site gevaloriseerd. De gassen worden op de locatie gebruikt, bijvoorbeeld voor verwarming van de pyrolysereactor en/of elektriciteitsproductie. In een geïntegreerde installatie worden ook de cokes op de locatie verwerkt (door middel van recuperatie, vergassing of verbranding).

### Verblijftijd en warmtetoevoer

Door in te spelen op de verblijftijd en de warmtetoevoer, kan de opbrengst van sommige fracties bevorderd worden. Bij trage pyrolyse worden vooral cokes gevormd, bij hoge warmtetoevoer en korte verblijftijden stijgt de opbrengst aan oliën en gassen [3].



### Reactortype en warmtetoevoer

Voor conventionele pyrolyse zijn een 4-tal technieken beschikbaar op pilootschaal of commerciële schaal [4]:

Draaitrommeloven met indirecte verwarming:

o.a. Technip (Pyropleq), Babcock/Noell/Steinmüller, Thide Environment (Eddith), PKA;

Statische oven met bewegend bed en indirecte verwarming:

o.a. Traidec, Pyrovac (Pyrocycling), Alcyon (Biothermic);

Statische oven met vast bed en directe verwarming:

o.a. Nexus Technologies (Softer);

Draaitrommeloven met directe verwarming en geïntegreerde vergassing:

o.a. Basse-Sambre E.R.I. (Serpac).

## Stand van de techniek

Een aanzienlijk aantal leveranciers bieden pyrolysereactoren aan, met verwerkingscapaciteiten die typisch tussen 1 en 6 ton/uur liggen. Hogere capaciteiten worden bereikt door meerdere reactoren in parallel te plaatsen. Een aantal leveranciers kan een ruime praktijkervaring voorleggen.

Niet iedere variant is echter reeds langdurig en op voldoende grote schaal uitgetest. Opschaling is voor een aantal processen moeilijk gebleken. Met name de warmteoverdracht is een kritische procesparameter.

Onder andere volgende afvalstoffen worden reeds op redelijke schaal door middel van

pyrolyse verwerkt [3, 4]:



In Vlaanderen zijn er momenteel geen toepassingen van pyrolyse voor de verwerking van afvalfracties bekend.

## Acceptatiecriteria

Pyrolyse is in principe geschikt voor de voorbehandeling van een breed gamma aan organische afvalstoffen, waaronder [4]:

* Gemengd kunststofafval;
* Plantaardig afval;
* Houtafval;
* Banden;
* Afvalolie;
* Zuiveringsslib;
* Shredder afval;
* Verontreinigde grond.

Pyrolyse vergt verkleining van het afval. Tenzij de installatie hiervoor ontworpen is, worden de concentraties aan Cl, F en S in de input bij voorkeur lager dan 1% gehouden.

Aanvullende acceptatiecriteria hangen af van de uiteindelijke verwerking van de pyrolyseproducten.

## Basisstoffen/hulpstoffen

De benodigde hulpstoffen hangen af van het type pyrolysereactor, van de technische aspecten van de installatie en van de eigenschappen van het afval:

Steunbrandstof: voor warmtetoevoer aan het pyrolyseproces;

Toeslagstoffen: om verstopping of sintering te voorkomen.

## Eindproduct

Pyrolyse levert 3 relatief homogene fracties. Het aandeel van iedere fractie is sterk afhankelijk van de voeding, van de gebruikte techniek en van de procescondities:

* Cokes;
* Condenseerbare gasfractie: water en oliën;
* Niet condenseerbare gasfractie.

Volgende tabel geeft ter illustratie een theoretische berekening van de verschillende

fracties, voor pyrolyse van huishoudelijk afval bij 550 °C [4]:

****

Voor de verdere verwerking van de cokes zijn een aantal processen beschikbaar:

* Recuperatie tot producten als actieve kool, carbon black, ...;
* Vergassing;
* On site verbranding met energierecuperatie;
* Off site verbranding in cementovens, elektriciteitscentrales, ...
* Verglazing, voor immobilisatie van de zware metalen.

Het condensaat kan verder verwerkt worden door:

* Vergassing;
* Kraking;
* Off- site of on- site verbranding met energierecuperatie.

De niet condenseerbare gasfractie wordt meestal zonder verdere zuivering verbrand in een stoomketel. Verdere zuivering kan de gasfractie geschikt maken voor de aandrijving van een gasturbine of een STEG-centrale. Eventueel kan de gezuiverde gasfractie als synthesegas gerecupereerd worden in de chemische industrie. Dit vergt echter een zeer doorgedreven integratie en een homogene en constante aanvoer van de afvalfractie. In de praktijk wordt het hergebruik van syngas enkel overwogen voor gemengd kunststofafval (zie 3.3.5 en 3.3.7).

## Emissies

De pyrolyseproces zelf heeft geen emissies. Emissies ontstaan enkel bij de zuivering en verdere verwerking van de verschillende fracties.

### Afvalwater

Afvalwater ontstaat enkel bij eventuele wassing van de cokes en gaswassing van de gasfractie.

### Luchtemissies

Luchtemissies ontstaan enkel bij verbranding van de pyrolyseproducten. Vermits de meeste grootschalige pyrolyse- installaties recent opgestart zijn, zijn weinig gegevens bekend over de emissies van de verbranding.

Het rookgasdebiet van pyrolyse + verbranding ligt lager dan het debiet van onmiddellijke verbranding. Voor de verbranding van de gasfractie kan een low NOxbrander gebruikt worden, waardoor lagere stikstofemissies mogelijk zijn dan bij klassieke verbranding van vaste afval.

### Afval

Uit de cokes kunnen metalen en inerten afgescheiden worden. Het aandeel van de hangt af van de inputsamenstelling.

## Referenties

1. State of the art of thermolysis as industrial technique for the treatment of domestic and hazardous waste, A. Fontana en C. Jung, Proceedings Belgian Nuclear Society, Antwerpen, juni 1998;
2. Thermolyse: Sens et non sens, Prof. Fontana, ULB, 2000;
3. Pyrolysis & gasification of waste: a worldwide business review, Juniper Consultancy Services, ISBN 0-9534305-8-8, 2000;
4. Thermal treatment of waste: Pyrolysis, A. Fontana en C. Jung, ULB in opdracht van OVAM, 2000;
5. Grondstofrecyclage van gemengd kunststofafval, VITO Expertisecentrum Grondstoffen in opdracht van OVAM, rapport 1999/GRO/R/020, 2000;
6. www.biomaster.nl, NOVEM.