

Verbranding - Vergassing - Pyrolyse

Vergelijkende studie opgesteld in Opdracht van BIONERGA, te Houthalen

Prof. Dr. Ir. Alfons Buekens

Domstraat 7
1602 Vlezenbeek
Belgium

tel. + 32 (0)2 532 57 79
Fax. + 32 (0)2 532 57 79
abuekens@vub.ac.be

30 maart 2010

Inhoudstafel

Inhoudstafel.....	2
Lijst der tabellen.....	3
1. Executive Summary	4
2. Inleiding	5
2.1. Procesbeschrijving	5
2.1.1. Thermische basisprocessen	5
2.1.2. Warmte-effect - Thermische balans	5
2.1.3. Gevormde producten.....	6
2.1.4. Gasvormige producten	6
2.2. Systeembeschrijving	7
3. Processen.....	8
3.1. Verbranding	8
3.1.1. Definitie en Producten	8
3.1.2. Huisvuilverbranding.....	8
3.1.3. Korte Historiek en Ontwikkelingen	9
3.1.4. Verbrandingsvoorwaarden en -processen	9
3.1.5. Veiligheids- en Milieuaspecten.....	11
3.1.6. Verbranding in de verwijdering van afvalstoffen	12
3.2. Vergassing.....	13
3.2.1. Definitie en Producten	13
3.2.2. Huisvuilvergassing.....	15
3.2.3. Historiek en Ontwikkelingen	15
3.2.4. Vergassingsvoorwaarden en -processen	16
3.2.5. Veiligheids- en milieuaspecten	17
3.2.6. Vergassing en verwijdering van afvalstoffen.....	18
3.3. Pyrolyse.....	18
3.3.1. Definitie en Producten	18
3.3.2. Huisvuilpyrolyse	19
3.3.3. Historiek en Ontwikkelingen	19
3.3.4. Pyrolysevoorwaarden en -processen	20
3.3.5. Veiligheids- en milieuaspecten	21
3.3.6. Pyrolyse in de verwijdering van afvalstoffen	21
4. Technische uitvoering van Thermische Processen	22
4.1. Roosteroven	22
4.1.1. Werkingsprincipe	22
4.1.2. Toepassingen in de afvalsector	22
4.1.3. Voor- en Nadelen	23
4.2. Schachtovens.....	23
4.2.1. Werkingsprincipe	23
4.2.2. Toepassingen in de afvalsector	23
4.2.3. Voor- en Nadelen	23
4.3. Roterende Trommelovens	24
4.3.1. Werkingsprincipe	24
4.3.2. Toepassingen in de afvalsector	25
4.3.3. Voor- en Nadelen	25
4.4. Wervelbed	25
4.4.1. Werkingsprincipe	25
4.4.2. Voor- en Nadelen	26
5. Effecten en randvoorwaarden	28
5.1. Milieu- en veiligheidsaspecten.....	28

5.1.1.	Atmosferische emissies.....	28
5.1.2.	Waterige emissies	28
5.1.3.	Vaste reststoffen.....	28
5.1.4.	Dioxines	29
5.2.	Energiereducatie	29
5.3.	Verglazen van vlieg- en bodemassen.....	30
5.3.1.	Definitie en producten.....	30
5.3.2.	Verglazen van Vlieggas	32
5.3.3.	Recuperatie van metalen uit vlieggas.....	33
6.	Besluiten.....	34
6.1.	De principes	34
6.2.	De technieken.....	34
6.3.	De processen	35
6.3.1.	Verbranding	35
6.3.2.	Vergassing.....	36
6.3.3.	Pyrolyse.....	36
7.	Algemeen Besluit.....	37
7.1.	Verbranding vs. Vergassing en Pyrolyse	37
7.1.1.	Uitvoerbaarheid.....	37
7.1.2.	Milieu- en veiligheidsaspecten.....	38
7.1.3.	Energiereducatie	38
7.1.4.	Grondstoffenrecuperatie.....	39
7.1.5.	Financiële afwegingen	39
7.1.6.	Algemeen Besluit Verbranding – Vergassing - Pyrolyse	40
7.2.	Wervelbedovens vs. Roosterovens.	40
7.2.1.	Uitvoerbaarheid.....	40
7.2.2.	Milieu- en veiligheidsaspecten.....	41
7.2.3.	Energiereducatie	41
7.2.4.	Grondstoffenrecuperatie.....	41
7.2.5.	Financiële afwegingen	41
7.2.6.	Algemeen Besluit Wervelbedovens vs. Roosterovens.....	42
7.3.	Aanbevelingen	42

Lijst der tabellen

Tabel 1	Enkele voor- en nadelen van Vuilverbranding	13
Tabel 2	Voornaamste technieken der vergassing	16
Tabel 3	Modelsamenstelling van diverse types synthese gas.	16
Tabel 4	Enkele voor- en nadelen van Vuilvergassing	18
Tabel 5	Enkele voor- en nadelen van Pyrolyse.....	21
Tabel 6	Enkele voor- en nadelen van het verglazen van vlieg- en bodemassen.....	33
Tabel 7	Technieken van thermische afvalverwijdering	34
Tabel 8	Enkele veel verbreide oventypes	35

1. Executive Summary

Een vergelijking wordt gemaakt tussen de drie thermische verwerkingsmethoden

Verbranding, Vergassing, en Pyrolyse,

eerst telkens in een industriële context, en vervolgens toegepast bij de verwijdering van vaste afvalstoffen. Deze processen kunnen worden uitgevoerd op basis van diverse technieken, o.m. in roosterovens, wervelbedeenheden, schachtovens, en draaitrommelovens. De meest klassieke uitvoering is in West Europa:

- Voor **huisvuil en gelijkgesteld bedrijfsafval**: verbranding in een roosteroven.
- Voor **industriëafval**: verbranding in een roterende trommeloven.

De voor- en nadelen van al deze **diverse alternatieven** worden nagegaan. In Europa en in de USA hebben de thermische alternatieven **Vergassing** en **Pyrolyse** van huisvuil nooit enig succes gekend. In Japan worden nu al 10 jaar hoofdzakelijk ofwel Vergassing en Pyrolyse-eenheden gebouwd, ofwel roosterovens (Verbranding) voorzien van een aangepaste verslakkende eenheid.

Deze ongewone keuze is te verklaren door een reeks verschillen in wettelijke voorschriften, institutionele context en kostenstructuur, als ook door de samenstelling en eigenschappen van het te verwerken huisvuil. Bijzondere aandacht gaat naar onze ervaringen met eenheden van Ebara (wervelbedvergassing met geïntegreerd smelten der vlieggas en eventueel der bodemas), Nippon Steel (schachtoven, met geïntegreerd smelten der bodemas en eventueel der vlieggas), en Hitachi Zosen (trommelpyrolyse met separate naverbranding van alle stromen).

Elk van deze staat model voor een generieke groep van min of meer analoge eenheden. Verder wordt ingegaan op:

- Mogelijkheden en moeilijkheden van energierecuperatie,
- Zin of onzin van de verslakkende en verglazing van vlieggas en/of roosteras of bodemas.

Tenslotte worden de diverse mogelijke opties vergeleken en besluiten worden geformuleerd betreffende de keuzes, die zich stellen voor Bionerga en de mogelijke wijzen om deze in te vullen. Onze keuze gaat duidelijk naar beproefde oplossingen, waarbij met een minimum aan extrapolaties wordt gewerkt. Technieken, die goed functioneren in Japan doen niet noodzakelijk hetzelfde bij ons. Overigens is het niet direct waarschijnlijk dat de befaamde Japanse constructeurs, zoals EBARA, ook bereid zullen zijn om in de E.U. mee te bieden aan een nieuw project.

AUTEUR. De auteur van deze studie doctoreerde zelf op pyrolyseprocessen en verkreeg in deze context drie wetenschappelijke prijzen (de Robert De Keyser prijs, de prijs van de Coca Cola Foundation en deze van de Körber Stiftung). Vermelde processen werden reeds een studieobject in de jaren 1975/77, 1984/86 en zijn het ook nog heden. De auteur was Raadgever van Ebara Co. (1988-2008) en bestudeerde Ebara-technieken in opdracht van de E.U. DG R&D, de E.U. DG Energie, het Franse ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Hij deed studies omtrent werkingsproblemen bij de Ebara-eenheden van Valdemingomez (Madrid) en Gien (Loiret) in opdracht van Dragados/Tirmadrid en van SYCTOM (eigenaar) en nadien TIRU/EDF (bedrijver).

2. Inleiding

2.1. Procesbeschrijving

2.1.1. Thermische basisprocessen

Verbranding – Vergassing – Pyrolyse zijn drie thermische basisprocessen die nagenoeg naadloos op elkaar aansluiten en niet zelden in analoge installaties uitgevoerd worden. Als voornaamste onderscheid kan gehanteerd worden:

Verbranding beoogt de (volledige) **mineralisatie** van een brandstof, op hoge temperatuur, met de bedoeling de chemische energie, beschikbaar in de brandstof, daarbij (nagenoeg) volledig vrij te stellen.

Vergassing beoogt een zo volledig mogelijke **omzetting** van een brandstof, in een gasvormige chemische grondstof (synthesegas, waterstof...) of in een brandstof met welbepaalde specificaties (o.m. samenstelling, calorische waarde, Wobbe-index). De omzetting gebeurt op hoge temperatuur (500 à 1.500°C) door een deel der brandstof intern te verbranden. Men spreekt daarom soms van ‘partiële oxidatie’.

Pyrolyse beoogt de thermische omzetting van een brandstof, met de bedoeling hieruit meer waardevolle chemische producten te bereiden of vrij te stellen. In tegenstelling tot de voorgaande thermische processen verloopt de pyrolyse nagenoeg nooit autoterm, maar wordt warmte extern toegevoerd aan de pyrolyse reactor. In engere zin gebeurt pyrolyse dus steeds in *afwezigheid* van enige externe luchttoevoer. In bredere zin wordt door bepaalde auteurs ook vergassing als ‘pyrolyse’ omschreven.

2.1.2. Warmte-effect - Thermische balans

In elk van deze processen staat een **thermische balans** over de installatie centraal. Uitgaande van dezelfde brandstof komt steeds dezelfde hoeveelheid energie vrij.

Bij verbranding wordt alle energie als warmte vrijgesteld.

Bij vergassing beperkt men zich tot een minimale warmte vrijstelling, nl. deze nodig om het proces autotherm te bedrijven. De resterende energie bevindt zich in de synthesegassen.

Bij pyrolyse wordt de vrijstelling van warmte niet nagestreefd. De energie blijft maximaal behouden in de chemische restproducten.

Teneinde een **thermisch proces** te onderhouden dient de brandstof een voldoende **calorische waarde** te hebben. Huisvuil wordt aldus na een zgn. Korte Analyse ingedeeld in:

- een bepaald **vochtgehalte**. Te vochtig vuil is niet (autoterm) brandbaar.
- een bepaald **asgehalte**. De as draagt niet bij tot de calorische waarde en vertraagt de toevoer van zuurstof.
- Het saldo, het brandbaar gedeelte. Dit laatste wordt nog verder onderverdeeld in:
 - **Vluchtige Stoffen** (stoffen welke, bij de temperatuur waarop het thermisch proces plaatsvindt, de brandstof verlaten en in de gasfase treden), die de vlammen voeden.
 - **‘Vaste’ Koolstof**, die aanleiding geeft tot een langzamer gloeiende verbranding.

Een **vergassingsproces** dient aldus:

- De Vluchtige Stoffen vrij te stellen en eventueel verder om te zetten.

- De Vaste Koolstof in gas om te zetten, via een onvolledige verbranding (omzetting van koolstof naar CO-gas).

Een **pyrolyseproces** levert:

- Vluchtige Stoffen (gassen en oliën)
- Residuele Koolstof.

2.1.3. Gevormde producten

Elk thermisch proces brengt een herverdeling van de brandstof over de drie fasen: gas, vloeistof, vast:

- Verbranding levert rookgassen en as.
- Vergassing levert brandbaar gas, mogelijk teer of vloeibare koolwaterstoffen, en as.
- Pyrolyse levert brandbaar gas, vloeibare koolwaterstoffen, teer, en een verkoold residu.

Vergassing en pyrolyse zijn belangrijke industriële processen. Echter voor de verwerking van huisvuil zijn deze processen meestal nutteloos, omdat de bekomen producten niet alleen laagwaardig, maar ook redelijk onvoorspelbaar in kwaliteit en samenstelling zijn.

Bovendien gebeurt de opwerking van deze producten op een te kleine schaal om economisch verantwoord te zijn. Pyrolyse van 300.000 ton huisvuil levert (in ronde getallen) bij voorbeeld:

- 75.000 ton of m³ sterk vervuild water.
- 75.000 ton as, vervat in 30.000 ton verkoelde residu's.
- 120.000 ton gas en olie. Deze bevatten naast koolwaterstoffen ook heel veel hetero-elementen, zoals zuurstof, stikstof, zwavel en chloor.

Technisch zijn deze te zuiveren. Echter, dit gebeurt dan via complexe en dure processen en op eerder kleine schaal. Beneden een capaciteit van 5.000.000 ton/jaar is een olieraffinaderij niet rendabel te bedrijven.

2.1.4. Gasvormige producten

- De rechtstreekse verbranding van huisvuil levert een 5.000 à 6.000 Nm³ gasvormige producten per ton huisvuil op.
- De vergassing van huisvuil levert slechts een gedeeltelijke verbranding, waarbij typisch tot 3 à 4 maal minder lucht wordt ingezet. Vergassing levert meestal een 2.500 à 3.000 Nm³ gasvormige producten per ton huisvuil. Echter deze dienen nog verder verbrand te worden, wat nog steeds met een beduidende luchtvermaat dient te gebeuren waardoor typisch een 4.000 Nm³ gasvormige eindproducten per ton huisvuil ontstaan.
- De pyrolyse van huisvuil levert minder dan 1.000 Nm³ pyrolysegas/ton huisvuil. Deze hoeveelheid gas neemt toe met stijgende pyrolysetemperatuur. Daarnaast ontstaat er een vloeibare fase en een verkoold residu. De relatieve hoeveelheid van deze drie fasen varieert zowel met aard en samenstelling van de grondstof als met de toegepaste reactievoorwaarden. De bekomen producten dienen wel nog verdere bewerkingen te ondergaan alvorens ze nuttig toegepast kunnen worden.

De verbranding van huisvuil levert dus de grootste hoeveelheid te reinigen gas. Echter dit gas is veel eenvoudiger te reinigen dan de gassen afkomstig van vergassing of pyrolyse. Bij een vergassing of pyrolyse ontstaat mogelijk een met olie, teer, en organische stoffen verontreinigd afvalwater, in tegenstelling tot bij verbranding.

2.2. Systeembeschrijving

Een thermische eenheid heeft tot taak reacties op verhoogde temperatuur uit te voeren. Belangrijke factoren zijn daarbij o.m.

- De warmteoverdracht, door straling, convectie en geleiding.
- Het gas/vast contact, essentieel bij de vergassing en verbranding.

Pyrolyseprocessen worden in de regel qua pyrolysesnelheid en productiviteit begrensd door de snelheid van warmtetoevoer.

Pyrolyseprocessen op lage temperatuur doen meestal beroep op trommelovens, waarbinnen de lading wordt opgewarmd door regelmatig contact met de uitwendig verhitte mantel. Ook wervelbedden zijn in trek. Een statische schachtoven is enkel geschikt, wanneer hij actief door een warmtedrager wordt doorstroomd.

Vergassing en verbranding hebben een interne warmteproductie gemeen. Daarbij worden vnl. ingezet:

- Roosterovens.
- Schachtovens
- Trommelovens
- Wervelbedovens

Andere oventypes, zoals tunnelovens komen minder voor.

Circulerende wervelbedden zijn enkel gangbare op grotere schaal dan in de afvalverwerking gebruikelijk is, o.m. in elektrische centrales.

Roosterovens worden al meerdere honderd jaar aangewend, o.m. bij het roosten van ertsen (cf. Agricola, *De Re Metallica*).

Amper 50 jaar geleden bedreef nog nagenoeg elke Vlaamse familie een continuhaard, met een stationair rooster, waarop bij voorkeur antraciet of magere kool op een rooster werden verbrand. Deze kolen branden nl. langzaam, zonder veel vlammen of roetende walmen. De haard verwarmde keukens en leefkamer, zoals ook de spijzen en de huisgenoten. Tevens werden deze niet zelden aangewend als minivuilverbrander, een praktijk die heel vervuilend uitpakt daar de rookgassen welke ontstaan bij deze verbranding ongezuiverd vrijkomen in de atmosfeer!

3. Processen

3.1. Verbranding

3.1.1. Definitie en Producten

Verbranding beoogt de (volledige) **mineralisatie** van een brandstof, met de bedoeling de chemische energie, beschikbaar in de brandstof, volledig vrij te stellen.

De verbranding van aardgas, LPG, benzine... levert hoofdzakelijk CO₂ en H₂O als **verbrandingsproducten**. Bij de verbranding van zware stookolie of steenkool ontstaan ook beduidende hoeveelheden SO₂, NO en N₂O, afkomstig van de zwavel (S) en stikstof (N) van de brandstof en van de stikstof uit de lucht (N₂).

3.1.2. Huisvuilverbranding

Huisvuilverbranding, ook wel **incineratie**, i.e. omvormen tot as of verassing, is een verwijderingstechniek voor afvalstoffen, waarbij deze laatste snel en goed gecontroleerd worden omgezet tot een steriel residu met minimaal volume.

Meer recent komen ook nog volgende tendensen naar voor:

- De **recuperatie van energie** aanwezig in de hete rookgassen.
Deze rookgassen worden normaliter afgekoeld in een middendrukketel (traditioneel een 4MPa of 40 atmosfeer), waarin het ketelwater wordt omgezet in stoom en vervolgens oververhit. Deze stoom wordt dan ontspannen in een stoomturbine, verbonden aan een alternator, waarbij elektrische stroom wordt opgewekt. De energie kan ook geheel of gedeeltelijk gebruikt worden om stoom en/of warmte te leveren aan industriële en/of huishoudelijke gebruikers.
Hoofdp probleem is het verzekerd vastleggen van een blijvende afzet der opgewekte energie. De verbranding van biomassa, vervuild papier & karton aanwezig in het huisvuil levert volgens de OVAM **groene energie**; deze van textiel, kunststoffen, rubber niet.
- De **valorisatie van reststoffen**.
De vaste verbrandingsresten worden vrij algemeen gevaloriseerd: in bepaalde bouwkundige toepassingen kunnen deze reststoffen immers zand, grind, en steenslag vervangen, waarbij de stortkosten en –milieutoeslagen vervallen.
Het vermijden van storten staat hoog in het vaandel in Vlaanderen, Zwitserland, en Japan. In Centraal en Oost Europa, Ierland, Griekenland, of Portugal komt het storten nog op de eerste plaats.
- De grondige **reiniging van rookgassen**.
De ruwe rookgassen van de vuilverbranding zijn ernstig verontreinigd. Ze worden dan ook in meerdere stappen gereinigd, met het doel stof, zware metalen, zure gassen, NO_x, dioxines... af te scheiden, te neutraliseren, of om te zetten tot onschadelijke reststoffen of gassen.
Sedert 1974 (TA-Luft = Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) en latere Duitse Codes (BImSchV = Bundesimmissionsschutzverordnung) werd het noodzakelijk de rookgassen steeds verder te reinigen. In een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) en bij huisvuilverbrandingsinstallaties (HVVI) bestaat het grootste deel der inrichting vandaag aldus uit warmteterugwinning en rookgasreiniging.
Bij de vuilverbranding worden tot op vandaag veel strengere emissienormen gehanteerd dan voor elektrische centrales, cementovens, of metallurgie.

3.1.3. Korte Historiek en Ontwikkelingen

De verbranding van huisvuil werd voor het eerst toegepast ca. 1860, in bepaalde Engelse steden en in het industriële Noordoosten van de USA. Het waren kleine, handgestookte eenheden, niet zelden voorzien van warmterecuperatie.

De eerste grotere installatie op het Europese vasteland werd gebouwd te Hamburg: na een cholera-epidemie ca 1895 kon deze Freie und Hansestadt niet langer haar huisvuil aan het platteland kwijt! Vandaag leeft in China nog steeds dezelfde zorg, naar aanleiding van de recente SARS-epidemie.

In de jaren twintig werd de algemeen toegepaste **industriële verbranding van steenkool** gemechaniseerd, door invoeren van kettingroosters, voorschuifroosters, kantelroosters... Vanaf de jaren '30 werd in heel wat steden huisvuil op de resulterende 'mechanische' roosters verbrand. Na de oorlog kregen alle grote steden in (West) Duitsland, grootschalige vuilverbrandingseenheden. Landen met plaatsgebrek (Zwitserland, Japan) volgden. Wervelbedeenheden werden hoofdzakelijk gebouwd en actief bedreven in Japan en in de Scandinavische landen. Daar is verbranding van afval samen met hout heel gangbaar. Denemarken valt op door een intense koppeling tussen vuilverbranding en stadsverwarming: de bevolking wordt met afval verwarmd, hetgeen de positie van de vuilverbranding uiteraard ten goede komt!.

Nederland bouwde de eerste grootschalige vuilverbrandingseenheden in 1912-16 (R'dam, A'dam, Den Haag). In België werden de eerste eenheden pas in de jaren '50 gebouwd: de eerste te Monceau sur Sambre naast een Intercom elektrische centrale, die bereidwillig alle stoom afnam, en de tweede te Schaarbeek. De eerste gebruikte een archaïsche reeks handgepookte cellenovens, de tweede functioneerde nooit behoorlijk, wegens ernstige conceptiefouten van de leverancier von Roll (Zurich). Beide bestaan niet meer.

Rond 1970 werden de eerste Vlaamse eenheden gebouwd, met subsidies van het Ministerie van Volksgezondheid. Dit zorgde voor een grote, gemeentelijke spreiding. Vele kleine eenheden (Beveren, Deurne, Heist o/d Berg, Izegem, Lokeren, Merksem, Ronse...) zijn inmiddels verwenen.

Tijdens de jaren '80 en '90 moesten de resterende eenheden heel hard investeren in verdere rookgasreiniging, andere verbeteringen (meet- en regeltechniek, automatisering) en energierecuperatie. Kleinere installaties konden deze tendens niet volgen en sloten hun deuren.

3.1.4. Verbrandingsvoorwaarden en -processen

Vanuit technisch en thermodynamisch opzicht, is het nuttig om een heel **hoge temperatuur** te halen, teneinde een efficiënt **warmtetransport** te verkrijgen (minder keteloppervlakken vereist), of omwille van **procesvereisten**, zoals het smelten van metalen, van glas of het laten reageren van kalk en klei tot cementklinker. Om deze reden wordt bij de verbranding een zo gering mogelijke **luchtvermaat** toegepast, omdat elk overschot lucht de verbrandingstemperatuur verlaagt. Samen met de luchtvermaat stijgt tevens het debiet der rookgassen, die achteraf (voor wat betreft de vuilverbranding) op een heel bewerkelijke wijze gereinigd moeten worden.

In de praktijk gebruikt men slechts een paar % luchtvermaat voor gasvormige brandstof, 5 à 15 % voor vloeibare brandstof en 30 à 150% voor vaste brandstoffen. Hoge temperaturen vertonen echter ook nadelen: ze vergen meer hittebestendige materialen (wat kritisch wordt in gasturbines en kostbaar in oververhitters van verzadigde stoom), ze leveren meer thermische NO en – in het geval van vaste brandstoffen - mogelijk ook problemen met aanbakkingen van kleverige en smeltende slakken.

Het handhaven en verwijderen van de as wordt technisch aldus een hoofdprobleem voor vaste brandstoffen. Twee werkwijzen zijn werkbaar: een 'normale' verbranding met verwijdering van as als stof en sintels van beperkte omvang, ofwel een verbranding bij verhoogde temperatuur (meestal > 1200°C of hoger), waarbij een vloeibare slak wordt afgetapt. Tussen beide in is een regelmatige slakkenafvoer nagenoeg niet te realiseren. Dit was één van de

problemen te Schaarbeek: in de slakkenschacht sinterde de as samen tot blokken met typische afmeting 1 m (de schachtdiameter), die niet meer te behandelen waren.

Volledige verbranding

Theoretisch is een volledige verbranding een te benaderen ideaal. Praktisch is ze nooit te verwezenlijken: naarmate de verbranding vollediger wordt stelt ze immers minder en minder warmte vrij. Aldus daalt de temperatuur en wordt de verbrandingssnelheid alsmaar geringer. Er ontstaat een dilemma: ofwel langduriger in een oven te verbranden (langere verblijfstijd op een rooster, of in een ovenruimte), die dan uiteraard groter worden, ofwel meer onverbrand over te houden.

Economisch gezien is er nauwelijks behoefte aan een verbrandingsrendement van meer dan een 99,5%: de laatste luttele 0,1% beïnvloedt nog nauwelijks de brandstofkost. Ecologisch liggen de kaarten echter gans anders, want het 'onverbrand' treedt op onder de vorm van kleurloos, moeilijk waarneembaar, maar heel giftig **CO** (dodelijk in geval van brand) en van allerlei organische stoffen, zoals **geurstoffen, benzeen, Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK), roet**, en de roemruchte **dioxines**, meer bepaald de polygechloreerde dibenzofuranen (PCDF) en dibenzo-p-dioxines (PCDD). Voor gevaarlijke afvalstoffen, zoals polygechloreerde biphenylen (PCBs) wordt dan ook een verbrandingsrendement tot 99,9999 gew.% vereist!

De onvolledigheid van de verbranding wordt gekenmerkt door de gehalten aan:

- **Koolmonoxide (CO)** in de rookgassen, normaliter enkele mg/Nm³. De grenswaarde van bijvoorbeeld 50 mg/Nm³ wordt enkel overschreden door piekwaarden, samenvallend met een storing in het verbrandingsproces.
- **Total Organic Carbon (TOC)** in de rookgassen, normaliter ook slechts enkele mg/Nm³. De grenswaarde van bijvoorbeeld 20 mg/Nm³ wordt enkel overschreden door piekwaarden, samenvallend met deze van CO. Omvang en frequentie van deze pieken zijn beide drastisch verminderd door een voortdurende verbetering aan het verbrandingsproces.
- **Onverbrand in de reststoffen - vliegassen.** Hier daalde de hoeveelheid onverbrand tot normaliter < 2 Gew.%.
- **Onverbrand in de reststoffen - roosterassen.** De hoeveelheid 'onverbrand' hangt hier sterk samen met ouderdom van de oven, de kwaliteit van de ovensturing en de aard en graad van vermenging der afvalstoffen.

Voorwaarden voor een volledige verbranding

- In de **gasfase** zijn de vereisten nodig voor een volledige verbranding:
 - Voldoende **zuurstof** voor volledige verbranding. In de praktijk is er een (beperkte) overmaat nodig.
 - Voldoende **temperatuur** voor volledige verbranding. De minimum temperatuur voor een redelijk volledige verbranding bedraagt 850°C in de gasfase, 1100°C in geval van gevaarlijke stoffen.
 - Voldoende **tijd** voor volledige verbranding. Deze tijdsgrens varieert, afhankelijk van andere parameters en bedraagt bijvoorbeeld 2 à 3 seconden bij 850°C. Bij 1500°C zijn enkele milliseconden mogelijk al voldoende.
 - Voldoende **turbulentie** of menging. Brandstof en luchtzuurstof moeten elkaar kunnen vinden op hoge temperatuur. Hete rookgassen worden echter viskeuzer, naarmate de temperatuur stijgt. Op hoge temperatuur (> 1000°C) wordt de menging meer en meer snelheidsbepalend.

Temperatuur, tijd, turbulentie worden vaak als **3 T's** aangeduid.

- Op een **rooster** gelden dezelfde voorwaarden, met één verschil: de verbranding van vaste stof gaat enkel door aan de buitenste oppervlakte van een vaste brandstof. Ideaal heeft deze brandstof dan ook een gelijkmatige stukgrootte, zodat alle brandstofdeeltjes na genoeg dezelfde tijd zijn uitgebrand. Een typische verblijftijd bedraagt dan een 20 à 30

minuten in de eigenlijke verbrandingszone. In vele installaties wordt deze voorafgegaan door een droogzone, waarin het vuil door straling vanaf het ovensgewelf wordt gedroogd en ontstoken.

Teneinde een vaste brandstof sneller te verbranden kan men beroep doen op:

- **Poederkoolbranders:** fijngemalen steenkool verbrandt veel sneller dan stukstof.
- **Wervelbedverbranding:** in een wervelbed wordt de brandstof in geen tijd opgewarmd en aangestoken. De voortdurende relatieve beweging van brandstof en wervellucht verzekert een heel snelle verbranding. Wel worden vele deeltjes meegeleurd uit het bed, waardoor er ofwel recycling van stofdeeltjes moet worden voorzien, ofwel een aanzienlijk brandstofverlies (5 à 10%) kan optreden.

Beide technieken worden toegepast in elektrische centrales, waarvan de capaciteit immers deze van gebruikelijke roosterovens ver overstijgt.

De verbrandingstechnieken voor huisvuil werden vooral ontwikkeld in Europa, door ondernemingen als Volund (de leverancier van de huidige eenheid, tevens de enige met trommeloven als uitbrandelement), Martin (terugschuifrooster, toegepast te Brugge en te Brussel), Vereinigte Kessel Werke, later Deutsche Babcock, von Roll, etc. De ovens van de jaren '60 en '70 zijn nu minder en minder geschikt voor verwerking van 'modern' huisvuil, met een hogere calorische waarde en geringere dichtheid, vocht- en asgehalte. Vandaar de tendens om oven en ketel te integreren en om eventueel een watergekoeld rooster te specificeren.

3.1.5. Veiligheids- en Milieuaspecten

De eerste klachten over de afvalverbranding (in de 19e eeuw) hadden voornamelijk betrekking op rook en roet, mogelijk ook reukhinder. In deze dagen waren nochtans walmende schoorstenen zeer in trek, vermids deze met tewerkstelling en economische welstand werden geassocieerd. Een nieuwe oven te Den Haag werd amper al na een paar jaar stilgelegd en het vuil vanaf de jaren '20 naar Wijster afgevoerd!

Een belangrijke vooruitgang verwezenlijkte de **elektrofilter**, veralgemeend vanaf de jaren '60: een elektrofilter reduceerde het stofgehalte van een 2.000 à 5.000 mg/Nm³ tot waarden beneden de 150 mg/Nm³. Dit maakte de rook onzichtbaar: immers, stofwaarden beneden 100 mg/Nm³ zijn nog amper visueel waar te nemen. Vandaag bedraagt het stofgehalte in de rookgassen normaliter minder dan 10 mg/Nm³, vaak enkel 2 à 3 mg/Nm³. Vele installaties verkiezen een dubbele ontstopping: een eerste elektrofilter haalt al het grootste deel van het stof tegen; na de neutralisatiestap volgt dan de mouwenfilter, die deze heel lage restwaarden verzekert.

Echter, er zijn naast stof nog heel wat andere verontreinigingen, verscholen in ruwe rookgassen, die vroeger ongemerkt passeerden! Jarenlang werd een 'wat niet weet, niet deert' politiek gehuldigd. Pas een 40 jaar geleden werd de analyse van SO₂, HCl, NO_x... veel minder bewerkelijk en automatiseerbaar. Apparaten laten nu toe om de hoeveelheid stof, O₂, CO₂, CO, H₂O, HCl, SO₂, NO, NO₂, N₂O, TOC (Total Organic Carbon) continu te meten en te registreren. Uniek ter wereld is in België de continue staalname en (meestal) 2-wekelijkse analyse van 'dioxines'. Aldus is de vuilverbranding in België de best gecontroleerde verbrandingstechniek ter wereld!

Er zijn voornamelijk twee strategieën mogelijk:

- De natte weg. Deze ziet er uit als volgt:
Stofafscheiding, gevolgd door natte gaswassers, eventueel een katalytische of niet-katalytische DeNO_x, eventueel adsorptie van vluchtige metalen (kwik, cadmium...), PAKs en dioxines op Actieve Kool. Deze laatste wordt dan door een mouwfilter afgescheiden.
- De (half-)droge weg, met als samenstelling:
Stofafscheiding, gevolgd door (half-)droge gaswassers, gecombineerd met adsorptie van vluchtige metalen (kwik, cadmium...), PAKs en dioxines op Actieve Kool, eventueel nog gevolgd of voorafgegaan door een katalytische of niet-DeNO_x. De droge gaswassing

heeft het moeilijk om aan nog strengere normen, dan diegene welke vandaag geldig zijn, te voldoen bij exclusief gebruik van kalkpoeder. Echter dankzij de toepassing van natriumbicarbonaat als neutralisatiemiddel zijn strengere normen wel haalbaar. De voordelen van het gebruik van natriumbicarbonaat zijn talrijk: meer reactief, minder overmaat, minder verstoppingen in de transportleidingen en mogelijk opwerken van de afgewerkte zouten. Nadeel is enkel een wat hogere kostprijs.

De bijkomende reinigingsstappen verlopen niet zonder moeite of kosten:

- Meerdere reinigingsstappen zijn nodig om het gewenste resultaat te verzekeren.
- Het eigen energieverbruik is gestegen van een 40 kWh/ton 40 jaar geleden naar 150 à 250 kWh/ton nu.
- Natte gaswassers leiden tot een natte stoompluim en mogelijk tot corrosie. Ze zijn zeer efficiënt bij het wassen van goed oplosbare gassen (HCl, SO₂). Corrosieproblemen werden naderhand opgelost door een aangepaste materiaalkeuze.
- Halfdroge gaswassers zijn eveneens efficiënt bij het wassen van goed oplosbare gassen (HCl, SO₂), maar vergen een beduidende overmaat reagens. Dit leidt tot meer reststoffen

De firma Solvay ontwikkelde een proces om afgewerkte zouten afkomstig van het gebruik van natriumbicarbonaat grotendeels te recycleren, zodat de stroom afvalzouten, afkomstig van de neutralisatie van zure gassen, grotendeels vervalt.

Een katalytische DeNOx biedt een hele reeks voordelen, zoals lage NOx-emissie en volledige afbraak van nog mogelijk aanwezige PAKs en dioxines in de gasfase. Wel moet het bedrijf zorgvuldig worden afgesteld, teneinde emissies van NH₃ en N₂O minimaal te houden.

3.1.6. Verbranding in de verwijdering van afvalstoffen

Vijftig jaar geleden werd in Vlaanderen nagenoeg alle afval gestort. Het kwam meestal toch tot een nuttige aanwending: laaggelegen, moerassen en drassige weiden werden 'gesaneerd' tot bouwgrond of industriegrond. Vandaag wordt het storten zo veel mogelijk ontraden (storthellingen) en vermeden. Enkel bepaalde industriële reststromen, baggerslib en niet recycleerbare residu's worden nog steeds gestort. Storthellingen maken dat ook puin en sloopafval steeds meer gerecycleerd en nuttig toegepast worden!

Heel wat landen in Zuid, Centraal en Oost Europa, en ook het Verenigd Koninkrijk, en Ierland storten nog nagenoeg alle afvalstoffen. Zwitserland echter eist dat alle gestorte stoffen volledig zijn gemineraliseerd. In Duitsland heerst een stortverbod voor vergistbare stoffen: enkel het digestaat van een **Mechanisch-Biologische behandeling** mag nog worden naar stortplaatsen afgevoerd worden. Deze relatief nieuwsoortige werkwijze gaat echter het probleem grotendeels uit de weg.

Na een geringe bijkomende recuperatie (want verpakking, kranten, etc. worden vooraf thuis al afgescheiden) blijven er twee fracties over:

- Een nat digestaat, dat nauwelijks in stortplaatsen is op te bergen, wegens stabiliteitsproblemen.
- Een droge, hoogcalorische brandstof.

Beide dienen eventueel toch nog verbrand te worden. De eerste stroom verbrandt heel slecht, wegens te vochtig, de tweede ook, wegens te droog en te hoogcalorisch. Afzet in cementovens of elektrische centrales struikelt over een specificatie < 0,2 à 0,5 gew.% chloor, die nagenoeg niet is aan te houden.

De Stad Gent bouwde als eerste (samen met Anderlecht) een compostbedrijf (1964), met manueel sorteren, gevolgd door trommelcompostering.

Klassieke problemen bij compostering zijn:

- Persistent of periodieke geurhinder
- Afzetproblemen voor compost.

Vandaag is wel duidelijk dat de **compostering van huisvuil** onmogelijk kwaliteitscompost kan leveren, omwille van verontreiniging door zichtbare plasticresten, glassplinters, etc. en niet zichtbare zware metalen. Zinvol, maar duur is een **selectief inzamelen** van groenafval, vooropgesteld uiteraard dat de afzet van compost is verzekerd. De kosten/baten van deze optie dient ook in Limburg te worden afgewogen.

Recycleren van afval is heel mooi voor waardevolle voorwerpen, zoals een tweedehandwagen, en antiek. Kortlevende, eenmalige verpakking vormt de keerzijde van de medaille in de distributiesector. Fost Plus zorgt voor een (eerder dure) oplossing. Meer bedreigend is het huishoudelijk gevaarlijk afval, gaande van solvent- of verfresten tot batterijen.

In dichtbevolkte gebieden is de afvalverbranding vandaag 'unumgänglich' geworden. In deze context profileert zich de **verbranding van huisvuil** (of ander afval) immers als een beproefde, volumereducerende techniek, met daarbij een ganse reeks pluspunten en ook minpunten: Tabel 1.

Tabel 1 Enkele voor- en nadelen van Vuilverbranding

Voordelen van Vuilverbranding	Nadelen van Vuilverbranding
<ul style="list-style-type: none"> • Reduceert huisvuil tot 5 à 10% van het oorspronkelijk volume en 20 à 30% van het oorspronkelijk gewicht. • Vervangt het storten van organisch afval, met heel beduidend broeikaseffect (methaan >> kooldioxide). • Energierecuperatie is veralgemeend. • Nuttige toepassing der reststoffen en metalen is heel gangbaar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Technisch complexe installaties, die dan ook beduidende investeringen vergen. • Kostprijs van een 100€/ton, 'all in'. • Nood aan technisch hooggeschoold personeel. • Grondige rookgasreiniging onmisbaar, met de daarbij horende residu's (meestal een 5% van het oorspronkelijk gewicht) • Energierecuperatie bewerkelijk en duur. • Beperkt een meer uitgebreide recycling.

3.2. Vergassing

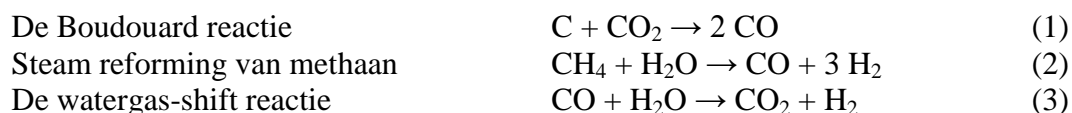
3.2.1. Definitie en Producten

Vergassing beoogt een zo volledig mogelijke **omzetting** van een vaste (eventueel vloeibare of zelfs gasvormige) brandstof, tot een gasvormige grondstof of brandstof met welbepaalde specificaties (o.m. samenstelling, calorische waarde, Wobbe-index), en normaliter bestemd voor bijmenging bij stadsgas, industriële toepassing (steenbakkerij, keramiek, glas- of porseleinovens) of chemische synthese.

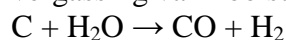
Vergassing van vaste brandstoffen wordt aldus sinds de jaren '20 grootschalig toegepast in de chemische nijverheid, in fabrieken van ammoniak, methanol, oxo-alcoholen, of Fischer-Tropsch oliën of benzine. Deze laatste weg was bijzonder belangrijk tijdens W.O. II in Duitsland en Japan. Houtvergassing speelde ook een belangrijke rol bij het aandrijven van voertuigen. In Zweden werden tijdens W.O. II een 50 à 60.000 voertuigen met houtvergassers aangedreven. Ook in België gebeurde dat en op het einde van de oorlog werden meer en meer Duitse voertuigen en zelfs tanks van een eigen vergasser voorzien.

Vergassing laat ook toe om op grote schaal **waterstof** te produceren. Meestal wordt echter de voorkeur gegeven aan steam-reforming van aardgas, LPG, of nafta (zie verder). Helaas hebben alle traditionele Belgische ammoniakfabrieken (Tertre, Willebroek, Marly, Oostende) al lang de deuren gesloten: deze belangrijke processen worden nu hoofdzakelijk toegepast aan de bronnen van goedkope brandstof, nl. olie of gas, of openlucht ontginning van steenkool (Sasolburg, Zuid Afrika). Belangrijke firma's als Montecatini, Shell, en Texaco ontwikkelden vergassingsprocessen voor zware stookolie, een moeilijk te vermarkten brandstof.

De vergassing van zware stookolie of steenkool levert een **arm gas** op met veranderlijke samenstelling, met hoofdzakelijk CO en H₂ als brandbare producten, daarnaast ook heel veel N₂, CO₂ en H₂O. Bij de vergassing van zware stookolie of steenkool ontstaan ook beduidende hoeveelheden H₂S, COS, HCN en NH₃, afkomstig van de zwavel (S) en stikstof (N) van de brandstof. De samenstelling van het geproduceerde gas is bij benadering berekenbaar als functie van de reactietemperatuur en de uitgangssamenstelling, op basis van het reactie-evenwicht van 3 omkeerbare chemische reacties, dat zich instelt op een wijze voornamelijk bepaald door **temperatuur** en **druk**:



- De **Boudouard reactie** (1) beschrijft de vergassing van koolstof door kooldioxide. De reactie is sterk endotherm en loopt enkel op hoge temperatuur af. Een analoge reactie is de vergassing van koolstof door waterdamp. Deze reactie komt neer op: (1) + (3)



Hoge druk en ook lage temperatuur keren het reactie-evenwicht om naar links.

- **Methanatie** is een exotherme reactie, die op lage temperatuur en verhoogde druk koolmonoxide katalytisch hydrogeneert tot methaan. Op hoge temperatuur verloopt de reactie ook katalytisch (< 850°C) of thermisch (> 1200°C) in de omgekeerde richting. Ze wordt dan **steam reforming** genoemd: reactie (2).
- De **watergas-shift reactie** is een licht exotherme reactie (3), die op lage temperatuur koolmonoxide katalytisch tot waterstof omzet. Op hoge temperatuur stelt het watergas-shift evenwicht zich spontaan in.

De samenstelling van het geproduceerde gas hangt verder samen met de volgende factoren:

- De samenstelling van de **brandstof**. Zo levert de vergassing van methaan (aardgas) of CH₄, meer waterstof op, dan deze van benzeen C₆H₆, omwille van verschil in hun C/H verhouding.
- De toegepaste hoeveelheid **lucht**. Meer lucht levert meer verbranding en een hogere vergassingstemperatuur. Echter, het geproduceerde gas wordt aldus armer en een slechte brandstof.
- De aanwezige hoeveelheid **water**. De *watergasreactie* levert immers waterstof en koolmonoxide op, beide brandbaar. Ze verbruikt echter warmte, die elders moet gevonden en geleverd kunnen worden.
- De aanwezige hoeveelheid **pyrolyseproducten**, zoals lichte koolwaterstoffen, benzeen, en teer, afkomstig van de ingezette brandstof (steenkool, bruinkool, turf, hout).

Deze producten verhogen beduidend de calorische waarde van het gas, maar leveren mogelijk ernstige problemen op bij het benutten ervan, in een motor of gasturbine. Meestal worden ze dan ook vooraf uitgewassen of thermisch gekraakt. Verder kan de samenstelling van het gas haast *ad libitum* worden aangepast door bijkomende bewerkingen zoals:

- De methanatie reactie, die op lage temperatuur afloopt en methaan vormt uit koolmonoxide en waterstof. Aldus kan men synthetisch aardgas (SNG = Synthetic Natural Gas) bereiden, bij voorbeeld uitgaande van steenkool.
- De watergas-shift reactie, die toelaat CO grotendeels in waterstof om te zetten.
- Het uitwassen van goed oplosbare gassen, vnl. CO₂, daarnaast diverse pollutanten, zoals H₂S.

3.2.2. Huisvuilvergassing

Huisvuilvergassing werd mogelijk voor het eerst ca. 1970 voorgesteld als een grootschalige verwijderingstechniek voor afvalstoffen. Daarbij ontstaat een **arm gas**, dat *theoretisch* voor alle mogelijke toepassingen kan worden aangewend, maar *praktisch* in nagenoeg alle gevallen onmiddellijk wordt verbrand. Dit laatste is ook maar logisch, want het is niet denkbaar om het gevormde gas ter plaatse op te slaan en het is bijzonder bewerkelijk om het te zuiveren. (theoretisch is het mogelijk om na methanatie aardgaskwaliteit te produceren. Echter, dergelijke schema's transformeren de afvalverwerking in mini-chemische fabrieken met, uiteraard, een niet-economische schaalfactor!)

De meeste afval vergassingsprocessen komen aldus neer op een verkapte tweetrapsverbranding, die enkel maar aanleiding geeft tot meer investeringen en meestal meer problemen dan de rechtstreekse verbranding. De reiniging van vergassingsproducten is bewerkelijk en wordt ten zeerste bemoeilijkt door de aanwezigheid van teernevelds, die ontstaan wanneer het gas beneden 400°C wordt gekoeld. Een bevredigende oplossing van deze problematiek passeert meestal over een hoogtemperatuur-kraking van de teer, die energetisch uiteraard ongunstig is.

De **valorisatie van reststoffen** wordt bij vergassing over het algemeen bemoeilijkt door een meestal mindere uitbrand van de reststoffen. Enkel wervelbedprocessen vormen een uitzondering op deze regel. Specifieke processen onderscheiden zich door het insmelten van bodemas, vliegias of beide (zie verder onder Nippon Steel en onder Ebara TwinRec proces).

Volgende processen kwamen het eerst op ons af:

- Het Amerikaanse **Andco-Torrax** proces. Er werden eenheden gebouwd te Grasse, Leudelange, Créteil, en Frankfort. De eerste staakte de strijd na enkele maanden, de tweede werd na een paar jaar vervangen door een Martin roosteroven., de vierde werd nooit opgestart. De derde was meer dan 20 jaar in een moeizaam bedrijf. Grasse betaalde nog ruim 20 jaar leningen af, aangegaan voor de bouw van een nutteloze eenheid.
- Het **Union Carbide** Unox proces. Vergassing met zuurstof. Niet toegepast in Europa. Werd een beter proces na het vooraf breken van vuil.
- Het **Monsanto** Landgard proces. Opgebouwd te Baltimore, meerdere malen verbouwd en tenslotte door een roosteroven vervangen.

Het voornaamste probleem met deze eenheden lag in een grof onderschatten van de probleemaspecten van huisvuil als brandstof en een te snelle schaalvergroting vanaf een proefopstelling naar een industriële realisatie. Monsanto stapte van 12 kg/h over naar 1,33 Mg/h om dan een eerste commerciële installatie te bouwen van 35 Mg/h. Deze fouten werden veel minder in Japan gemaakt, waar al in de jaren '80 sommige eenheden (**Ebara Stardust** pyrolyseproject, **Nippon Steel** vergasser) met enig succes enige tijd functioneerden.

Dezelfde fouten werden naderhand door talloze bedrijven herhaald in de jaren '80 en '90. Meest spectaculair was het falen van **Siemens** te Fürth: de vergassingseenheid werd gesloten na het uittreden van een giftige en geurige gaswolk. **Thermoselect** bouwde een heel aantrekkelijke installatie te Karlsruhe. Ze werd gesloten nadat duidelijk was gebleken dat ook dit proces vooral op 'wishful thinking' was gebaseerd: de voorgespiegelde stofstromen vonden geen afzet.

3.2.3. Historiek en Ontwikkelingen

De nood aan vergassingsprocessen dateert vooral uit de jaren '20, met de ontwikkeling door deze twee Nobelprijswinnaars (!) chemie van de Haber-Bosch route om synthetische N-meststoffen te produceren. Tevens was vergassing belangrijk, om het gas van gas + cokesfabrieken aan te vullen, gebruikt als stadsgas en gasvormige industriële brandstof.

Industriële vergassing wordt toegepast op vaste brandstoffen volgens drie basismethoden, waarop er uiteraard ook talloze varianten werden ontwikkeld.

Dit zijn:

- **Schachtovens**, te visualiseren als een hoogoven in de bereiding van ruwijzer, waarin nochtans geen ijzererts werd geladen. Deze techniek werd ruim 50 jaar geleden door LURGI (Frankfort) in Zuid Afrika ingevoerd. Ze is minder geschikt voor bakkende steenkool.
- **Wervelbedovens**, voor het eerst te Leuna gebouwd door Winkler (ca. 1924). Dit was meteen de allereerste bewuste toepassing van wervelbedtechnieken. Deze eenheden werkten nog steeds bij de val van de Berlijnse muur!
- **Koppers-Totzek**, vergelijkbaar met een poederkoolbrander werkend met een ondermaat aan verbrandingslucht. Wordt o.m. toegepast in India. Door de hoge vergassingstemperatuur is de as gesmolten; ze wordt vloeibaar afgetapt.

Tabel 2 Voornaamste technieken der vergassing/partiele oxidatie

Techniek	Schachtoven	Wervelbedoven	Gelijkstroomreactoren	Draaitrommel
Naam	Lurgi	Winkler	Koppers-Totzek	Monsanto
Stroomrichting	Tegenstroom	Dwarsstroom	Gelijkstroom	Tegenstroom
Temperatuur, °C	Tot 1.200	850	1.500	> 500
Medium	Zuurstof/stoom of lucht	Lucht	Zuurstof + stoom	Partiële oxidatie
Druk, MPa	1.5 tot 3	0.1		0.1
Nota's	drukvergasser voor niet bakkende kolen	Wervelbed	Vloeibare slakken	Tweetraps verbranding

3.2.4. Vergassingsvoorwaarden en -processen

Deze bespreking beperkt zich tot vaste brandstoffen en afvalstoffen. Bepalend voor een techniek is de wijze waarop de vaste stoffen in contact worden gebracht met het vergassingsmiddel, de aard van dit middel (lucht, zuurstof + stoom, met zuurstof aangerijkte lucht) en de reactiecondities (temperatuur en druk), die daarbij worden ingesteld. De keuze voor een bepaalde techniek hangt samen met de aard van de grondstof en van de gewenste eindproducten.

Tabel 3 Modelsamenstelling van diverse types synthese gas.

Ammoniaksynthese	Methanolsynthese	OXO-aldehyden OXO-alcoholen	Fischer-Tropsch
$N_2/H_2 = 1/3$ CO schadelijk CH ₄ ongewenst	$CO/H_2 = 1/2$ CO ₂ ongewenst	Olefine/CO/H ₂ = 1/1/1 Olefine/CO/H ₂ = 1/1/2	CO/H ₂ = 1/1

Vanuit technisch en thermodynamisch opzicht, is het nuttig om een redelijk **lage temperatuur** te behouden, teneinde enkel een minimum aan brandstof te verbranden. Dit wordt heel goed door de Winkler wervelbedtechniek verwezenlijkt en het minst goed door de Koppers-Totzek technologie.

Er is ook een balans te maken tussen brandstof verbranden en de vereiste temperatuur te bereiken, en de kwaliteit van het bekomen gas. De warmtebalans speelt hier aldus een grote rol! In de praktijk verbruikt men een 20 à 35 % van de stoichiometrische hoeveelheid lucht, theoretisch nodig voor volledige verbranding. Dit levert dan gasvormige brandstof i.p.v. warmte.

Om een kwalitatief goed gas te bekomen kan men de vergassing met lucht vervangen door deze met zuivere **zuurstof**, normaliter getemperd door stoom. Ook kan men de lucht aanrijken met zuurstof (wat energetisch kostbaar is) ofwel deze voorwarmen op hoge temperatuur, zelfs tot haast 1.000°C. Tenslotte kan men afwisselend warm en koud blazen, respectievelijk met lucht en met stoom. Het eerste levert alternatief heel arm luchtgas (calorische waarde 500 à 900 kcal/Nm³) en watergas (calorische waarde 2.500 à 3.000 kcal/Nm³).

Ter vergelijking:

- Stadsgas (calorische waarde 4.250 cal/Nm³)
- Aardgas, indien enkel methaan (calorische waarde 10.000 cal/Nm³)
- Propana (calorische waarde 24.000 cal/Nm³)
- Butaan (calorische waarde 32.000 cal/Nm³)

Met armgas kan men een motor nog juist laten draaien; wordt deze belast, dan valt hij direct stil!

Stroomrichting

Een vergasser met schachtoven kan o.m. bedreven worden in **tegenstroom**. In een schachtoven komt het tot een opeenvolging van stappen, achtereenvolgens doorlopen terwijl de lading steeds verder zakt in de schacht, meer bepaald:

- Drogen.
- Opwarmen en ontgassen, met geleidelijk vrijstellen van Vluchtige Stoffen, als pyrolyseproducten, terwijl het residu steeds verder verkoolt.
- Vergassen, d.i. reactie tussen het verkoold residu en stoom (reacties 1+3) en kooldioxide (Boudouard reactie 1).
- Verbranden van koolstof met lucht of zuurstof vergassingsmiddel.

Tegenstroomvergassing heeft een belangrijk voordeel: de voelbare warmte van het gevormde gas gaat gedeeltelijk of zelfs grotendeels over op de lading, wat de warmtebalans baat.

Tegenstroomvergassing heeft ook een belangrijk nadeel: het gas is beladen met pyrolyseproducten. Dit verhoogt weliswaar de calorische waarde, maar het gas is met teer beladen. Dit laatste is gedeeltelijk te vermijden in een **gelijkstroomvergasser**: de gevormde pyrolyseproducten worden nu gedwongen doorheen de gloeiende haard te stromen, waarbij kalking van teerlevels optreedt.

Tenslotte zijn er ook **dwardsstroomvergassers** gebouwd, vooral voor voertuigen: dit type reageert sneller op een druk op het 'gaspedaal'!

3.2.5. Veiligheids- en milieuaspecten

Vergassing is eenvoudig visualiseerbaar als een verbranding, die wordt uitgevoerd met te weinig lucht, teneinde te komen tot een voldoende rijk en brandbaar gas.

Vergassing is aldus verantwoordelijk voor de sterfte, die zich telkens weer in de huiselijke kring voordoet, vnl. tijdens de winter (oudjes verstikt door hun kachel), bij onvoldoende trek (gasboiler) en ongunstige atmosferische condities (inversie).

De gasvormige producten vertonen naast het vermelde verstikkingsgevaar ook nog gevaar voor explosie (bij gaslek) en brand. Vergassing gaat steeds gepaard met pyrolyse. De veiligheids- en milieuaspecten hiervan worden verder vergelijkend besproken.

De milieuaspecten zijn normaliter ernstiger te nemen dan deze bij verbranding.

Het wassen van het gas, om teer te verwijderen leidt tot heel moeilijk te zuiveren afvalwater, beladen met o.m. olie, teer, PAKs, fenolen, cyaniden...

3.2.6. Vergassing en verwijdering van afvalstoffen

De vergassing van biomassa en ook van afvalstoffen is sinds de eerste aardolieschok zowat overal aan de orde. Het aantal pogingen tot ontwikkeling is ook in Europa heel groot geweest, het aantal geheel of gedeeltelijke mislukkingen precies even hoog. Geen enkel Europees proces is vandaag immers als 'Stand der Techniek' voorstelbaar of verdedigbaar.

Uiteraard is het wel *mogelijk* om huisvuil op permanente wijze te vergassen: dit werd gedurende geruime tijd bewezen te Créteil (Andco-Torrax) en nu ook – sinds tien jaar – in Japan. Zelf leidden we ABOS-projecten omtrent houtvergassing in Kalima (Kivu) en Bogor (Indonesie). De firma Lambiotte (Marbehan) reed met een wagen met commerciële benzinemotor van Louvain-la-Neuve naar Marbehan. De Heer Evrard, Ford verdeler te Hoei, was eveneens actief. Een Noord-Franse transportfirma rustte een deel van haar vrachtwagens uit met vergassers. Wil men met een vergasser zijn wagen uitrusten en laten rijden, dan kan dit wel. Men moet wel een paar uur vroeger opstaan, om de vergasser aan te steken. Men moet ook zijn rijstijl aanpassen: gas geven levert slechts na 10 à 20 seconden resultaat!

In deze zelfde context situeert zich de **vergassing van huisvuil** (of ander afval) als een in Europa steeds weer falende techniek. Steeds weer duiken nochtans nieuwe voorstellen en projecten op, met een reeks plus- en minpunten: Tabel 4.

Tabel 4 Enkele voor- en nadelen van Vuilvergassing

Voordelen van Vuilvergassing	Nadelen van Vuilvergassing
<ul style="list-style-type: none"> • Productie van brandbaar gas i.p.v. warmte. • Geringer te reinigen gasdebiet. • Mogelijk aandrijven van gasmotoren, of gasturbines. 	<ul style="list-style-type: none"> • Slechts zelden is er een lokale toepassing voor gas aanwezig. • Moeilijke gasreiniging (teerlevels). • Complexe eenheden en dito bedrijfsvoering.

Op dit ogenblik kunnen een paar processen in Japan beschouwd worden als Stand der Techniek, meer bepaald:

- Het Schachtovenproces van o.m. Nippon Steel.
- Het wervelbedproces van o.m. Ebara.

3.3. Pyrolyse

3.3.1. Definitie en Producten

Pyrolyse beoogt de thermische omzetting van een brandstof of grondstof, met de bedoeling hieruit meer waardevolle chemische producten te bereiden of vrij te stellen. In engere zin gebeurt pyrolyse in afwezigheid van enige luchttoevoer. In bredere zin wordt door bepaalde auteurs ook vergassing als 'pyrolyse' omschreven.

Pyrolyse heeft veel namen en synoniemen: naar gelang van de betrokken industriële sector en de beoogde producten staat pyrolyse immers ook bekend als

- **verkoling**, o.m. de productie van metallurgische cokes uit aangepaste steenkool, of van houtskool uit houtafval. Vroeger kende men ook beenderkool, bloedkool...
- **kraken** of **cracking** (petrochemie, petroleumraffinaderijen), het omzetten van zware oliefracties in meer waardevolle lichte destillaten, de thermische kalking van koolwaterstoffen tot petrochemische grondstoffen (het zgn. *whitening the barrel*).
- **thermische ontleding, droge destillatie**... als chemisch-analytische techniek, o.m. om de structuur van organische moleculen te doorgronden.

Ook in de pyrometallurgie wordt de term gebruikt, maar in een andere context; zo bedrijft Umicore te Olen een hydrolyse van kobaltchloride.

3.3.2. Huisvuilpyrolyse

De pyrolyse van huisvuil werd historisch een aantal malen getest, o.m. in de jaren '70.

De eerste poging ging uit vanuit de idee, een oude gasfabriek te Kolding (Denemarken) als verkolingsinstallatie te bedrijven: het **Destrugas** proces werd geboren (United States Patent 3744439). Na enkele reeksen testen werd de idee opgegeven. De idee werd nog verder getest door de TU Berlin.

Met steun van EPA bouwde **Occidental Petroleum** een flash pyrolyse-eenheid, met capaciteit 200 ton/dag te El Cahon (Californie). De idee was afkomstig van een Dr. Garrett: huisvuil werd door malen en klasseren eerst omgezet tot pluisjes. Deze werden dan in de pyrolyse-reactor geblazen en er vermengd met gloeiende kooldeeltjes, waarbij uit het huisvuil olie werd gekraakt. Deze olie is echter moeilijk vergelijkbaar met aardolie!

Het bleek niet mogelijk om grote hoeveelheden huisvuil tot pluisjes te verwerken, wegens enorme slijtage. Na veel gesukkel werd voldoende geproduceerd om de reactor enkele malen op te starten. Alles samen draaide deze nog geen 5 minuten!

Beter verging het een Duits uitvinder, de Heer **Kiener**. Hij verwarmde een pyrolysetrommel met de uitlaatgassen van een motor en slaagde er later in zijn proces aan de Fa. **Siemens** te verkopen. Ook **Babcock Kraus-Maffei Industrieanlagen** (BKMI) bouwde een huisvuilpyrolyse met draaitrommel te Burgau (Beieren). De installatie draaide jarenlang, na meerdere wijzigingen.

De idee werd overgenomen door meerdere andere projectontwikkelaars. Zo werden door **Thide** in Frankrijk pyrolyseovens gebouwd. **Hitachi Zosen** nam een licentie en bouwde meerdere installaties in Japan. Tijdens ons bezoek aan de grootste hiervan (Izumo) werd ons verklaard dat de aanbidding van nieuwe installaties werd gestaakt, zolang niet alle kinderziekten van de baan waren.

De meest recente ontwikkelingen waren deze van het **Siemens** proces en het **Thermoselect** proces. Er werden 2 grote demonstratie-eenheden gebouwd, de ene in Fürth, de tweede in Karlsruhe. Om uiteenlopende redenen moesten beide al lang de deuren sluiten.

3.3.3. Historiek en Ontwikkelingen

Pyrolyse is één van de oudste menselijke processen: de **bereiding van houtskool** uit hout wordt ook vandaag nog op artisanale wijze bedreven, o.m. in Zwart Afrika. De Belgische firma Lambiotte (Marbehan) patenteerde ca. 1935 een schachtoven, die ook vandaag nog wordt geïmiteerd, o.m. in Brazilië. In dat land worden Eucalyptusbomen verbouwd en telkens 1/3 gekapt na 3, 6, en 9 jaren. De stammetjes worden dan tot houtskool verwerkt.

De **pyrolyse van ethaan, LPG, nafta** (of zelfs ruwe olie) is het basisproces van de chemische nijverheid. Eenheden met capaciteit 1 M ton/jaar leveren hoofdzakelijk ethyleen (C_2H_4) en propyleen (C_3H_6), de twee voornaamste bouwstenen van de petrochemie op. De nevenproducten butadiëen, en BTX worden verwerkt tot respectievelijk rubber en diverse aromaten en afgeleide producten. Dit proces wordt toegepast in reusachtige kringseenheden, o.m. te Antwerpen, Geleen (NL), Terneuzen (NL), en Wesseling (D). Deze leveren ethyleen via Pipelines aan synthesebedrijven langsheen het Albert Kanaal.

Er bestaan ook kleine pyrolyse-eenheden. Zo werd bij Fabelta-Tubize cellulose met azijnzuuranhydride tot celluloseacetaat omgezet, een plastic waaruit o.m. kammen en tandenborstels worden vervaardigd. Daarbij ontstaat als nevenproduct azijnzuur. Dit laatste wordt tot keteen gekraakt, dat dan weer tot azijnzuuranhydride werd omgezet, zodat de kring gesloten wordt.

Zelf hebben we ook kleine pyrolyse-eenheden ontworpen voor Polystyreen (Dow Chemicals, Terneuzen) en vooral voor Polymethylmetacrylaat (PMMA), beter bekend als Plexiglas, Perspex, etc. De eerste PMMA-eenheid werd door de Verenigde Naties gefinancierd, als steun voor Shanghai Resource Recovery and Recycling. De tweede ontwikkeling was voor rekening van du Vergier Ltd., een bedrijf te Hoddesdon (N.O. Londen).

3.3.4. Pyrolysevoorwaarden en -processen

De belangrijkste pyrolyseparameters zijn:

- De pyrolysetemperatuur.
- De pyrolyseduur.
- De druk.
- De eventuele aanwezigheid van katalysatoren.

De **pyrolysetemperatuur** is de belangrijkste procesparameter. De temperatuur bepaalt namelijk:

- De thermische stabiliteit van de grondstof.
- De thermische stabiliteit van de diverse individuele pyrolyseproducten. Deze kunnen nl. alle verder reageren.
- De pyrolysesnelheid, die snel toeneemt met de temperatuur.

De **pyrolyseduur** speelt eveneens een belangrijke rol: pyrolyseprocessen verlopen progressief (cf. verkoling). Men maakt vaak het onderscheid tussen:

- **Primaire producten**, die een structuur hebben rechtstreeks aansluitend bij de structuren binnen het uitgangsmateriaal.
- **Secundaire, tertiaire ... producten**, die een structuur hebben die aansluit bij deze van primaire, secundaire, producten, waaruit ze ontstaan.

Het **pyrolyseproces** wordt op een bepaald ogenblik afgebroken. Dit gebeurt redelijk vroeg, indien de primaire producten het meest waardevol zijn, pas later wanneer secundaire, tertiaire... producten gewenst zijn. Na lange duur bekomt men meer en meer eenvoudige moleculen: op hoge temperatuur blijven dan vnl. koolstof en waterstof over.

Pyrolyseprocessen verlopen vaak op een heel complexe wijze, vaak volgens ketenmechanismen, waarin reactieve intermediairen de hoofdrol spelen. Mechanismen variëren nog met de procesvoorwaarden, verontreinigingen katalyseren of inhibiteren, etc.

De optimale **pyrolysetemperatuur en duur** worden dan ook steeds empirisch bepaald: het zijn de procesvoorwaarden, die het meest interessante productenpalet opleveren.

De meeste processen werken bij **atmosferische druk**.

Enkele processen werken onder **hoge druk**. De bedoeling is meestal om aldus de productverdeling te beïnvloeden, bijvoorbeeld:

- Meer vloeibare en minder gasvormige producten te verkrijgen.
- Hydrogenatiereacties te bevorderen.

Soms wordt **onder vacuüm** gewerkt: heel wat pyrolyseproducten gaan nl. opnieuw polymeriseren, waardoor het gewenste doel niet wordt bereikt. Rubber wordt wel eens onder vacuüm ontbonden.

De aanwezigheid van katalysatoren laat toe het pyrolyseproces te versnellen en te sturen. katalytische kalking wordt vnl. op plastics toegepast.

Temperatuur

Pyrolyseprocessen worden onverdeeld in laag-, midden-, en hoogtemperatuursprocessen.

- **Laagtemperatuursprocessen** (< 500°C; Duits = Schwelung) laten toe om o.m. hout om te zetten tot houtskool. Bij deze processen wordt voor huisvuil meestal een uitwendig verwarmde trommeloven gebruikt. Ook een schachtoven of een tunneloven zijn mogelijk bruikbaar. Uit kunststoffen worden oliën en wassen gevormd. Hierbij wordt dikwijls een roerketel toegepast.
- **Middentemperatuursprocessen** (500 tot 900°C) worden hoofdzakelijk in wervelbedovens doorgevoerd.
- **Hoogtemperatuursprocessen** (> 900°C) worden nagenoeg uitsluitend toegepast in gasfabrieken of cokesfabrieken.

Technieken

- Pyrolyseprocessen worden bij voorkeur op **lagere temperatuur** uitgevoerd, bijvoorbeeld in een **draaitrommel**, opgesteld in een externe oven, of via verbranding in een dubbele mantel rond de trommel.
- **Wervelbedsystemen** doen normaliter beroep op 2 wervelbedden, één voor pyrolyse en een tweede waarin de pyrolysekool wordt verbrand en aldus het bedmateriaal verhit. Het verhitte materiaal vloeit terug naar de pyrolyse reactor. Ebara en Tsukishima Kikai hebben beide een (verschillend) tweebeds circulatiesysteem ontwikkeld en getest. Geen van beide wordt nog toegepast.
- Heel veel pyrolyseprocessen werden ontwikkeld voor de pyrolyse van plastics en rubber. Een **schachtoven** werd door Foster Wheeler ingezet in de pyrolyse van rubberbanden; hete gassen verwarmden de banden in dwarsstroom. Sumitomo gebruikte voor dezelfde toepassing een draaitrommeloven.

3.3.5. Veiligheids- en milieuaspecten

Pyrolyse is niet helemaal van gevaar gespeend: de DSM pyrolyse-installatie heeft bij een explosie heel wat mensenlevens geëist¹.

De kunststofpyrolyse-eenheid te Niigata werd getroffen door een zware brand: de vloeibare plastics werden uit de reactor gedreven, nadat er stroomafwaarts een verstopping was opgetreden. Ze werd een paar jaar geleden stilgelegd wegens te duur + geen afzet van de producten: de geproduceerde gas-oil bevatte teveel chloor om verkoopbaar te zijn.

De Siemensinstallatie te Fürth werd stilgelegd na het ontstaan van een gaslek.

Pyrolyse levert brandbare en ook vaak giftige en kankerverwekkende stoffen. De meeste pyrolyseprocessen zijn dan ook zeer vervuilend.

3.3.6. Pyrolyse in de verwijdering van afvalstoffen

Bepaalde afvalstoffen leveren door pyrolyse **waardevolle grondstoffen**. Zo zijn bepaalde polymeren in hun monomeer om te zetten. Dit kan dan een waardevol product zijn.

Polymethylmetacrylaat wordt kleinschalig gedepolymeriseerd in methylmetacrylaat, bruikbaar als additief in smeerolie (V.I.-improver), in acryjilverven, of – meer ambitieus (strengere specificaties vereist) – als monomeer.

Pyrolyseovens (kamerovens, wervelbedeenheden) worden veel toegepast bij de recuperatie van metalen of voorwerpen, die verkeerd gecoat, gelakt of geverfd zijn.

De pyrolyse van huishoudelijke afvalstoffen verdient niet echt een plaats in de verwijdering. Het proces is hiervoor te complex, te duur, en vooral, veel te vervuilend. Het is een illusie dat de pyrolyse van huisvuil, een bijzonder variabele grondstof, enig product van nut zou kunnen opleveren: elke productfractie is grondig vervuild met alle denkbare verontreinigingen: de elementen O, S, N, Cl, verder vluchtige zware metalen en as.

Tabel 5 Enkele voor- en nadelen van Pyrolyse

Voordelen van Pyrolyse	Nadelen van Pyrolyse
<ul style="list-style-type: none"> • Conversie van afvalstoffen in stockeerbare vaste en vloeibare brandstoffen. 	<ul style="list-style-type: none"> • De toevoer van externe warmte vereist technisch complexe oplossingen. • De bekomen pyrolyseproducten bevatten alle denkbare onzuiverheden en zijn enkel na raffineren verkoopbaar. • De huisvuilpyrolyse levert geen enkele waardevolle deelstroom.

¹ In 1975 kwamen door een explosie van de naftakraker NAK-2 in Echt veertien mensen om het leven, ruim honderd anderen raakten gewond.

4. Technische uitvoering van Thermische Processen

4.1. Roosteroven

4.1.1. Werkingsprincipe

Industriële mechanische roosters verbranden steenkool op basis van een **dwarsstroom** contact: de brandstof beweegt in een nagenoeg horizontaal vlak, van voedingszijde naar asafvoerzijde. De **primaire lucht** doorstroomt deze laag van onder naar boven.

4.1.2. Toepassingen in de afvalsector

Huisvuil is een heel wat moeilijker brandstof dan steenkool van een welbepaald kaliber. Naast zijn transportfunctie dient het rooster nu ook nog om de brandende laag vuil te poken. Dit gebeurt door de roosterstaven via een passende aandrijving bepaalde bewegingen te laten uitvoeren. Men kan daarbij onderscheiden:

- Een reeks opeenvolgende kettingroosters, telkens gescheiden door een trap,
- Traproosters, eventueel verder opgedeeld in secties, telkens met voorschuiwbeweging van alternerende treden,
- Traproosters, met voorschuiwbeweging van alternerende trapsegmenten,
- Traproosters, met terugschuiwbeweging van al de treden,
- Roosters, met kantelbeweging van alternerende treden,
- Combinaties van voorgaande, o.m. in het rooster van Seghers Engineering (later S. Better Technology, nu Keppel-Seghers).

De verbrandingsroosters en ovens werden stapsgewijs verbeterd en aangepast. Oorspronkelijk werden de meeste van deze roosters gepatenteerd, i.v.m. hun schikking, voorzieningen om de roosterstaven te profileren, te koelen, te reinigen... Een overzicht van de desbetreffende patentliteratuur werd destijds voorbereid in opdracht van de N.V. Denayer, te Willebroek. Sommige roosters zijn nu watergekoeld, wat desgewenst toelaat met minder primaire lucht te werken.

Het vuil wordt op het rooster voortbewogen door een combinatie van de voorschuiwbeweging en graviteit: meestal vertoont het rooster nl. een lichte helling. Traproosters met terugschuiwbeweging schuiven brandend vuil onder vers vuil, wat een bijkomende vermenging veroorzaakt.

Een belangrijk probleem is de uiteenlopende samenstelling van het huisvuil:

- Een groot pak nat vuil heeft veel meer tijd nodig om te drogen,
- Een pak kunststof is vrij droog, verwarmt heel snel, ontvlamt en verbrandt dan heel plots, en veroorzaakt daarbij dan een lokaal te kort aan lucht.
- Stof wordt meegesleurd en zal soms wel, soms niet opbranden terwijl het slechts korte tijd in oven en ketel verblijft.

Teneinde deze nefaste variaties te reduceren kan men o.m.:

- Het huisvuil vermengen met de grijper van de kraan, die de oven voedt.
- Het huisvuil malen, vermengen en homogeniseren, bijvoorbeeld in een roterende kogelmolen.
- Het huisvuil verkleinen, klasseren en omzetten in een 'fluff', in pellets...

Enkel de eerste optie wordt algemeen toegepast. De andere opties zijn eveneens efficiënt, maar heel duur (ruimte, investeringen, bedrijfskosten, slijtage, energieverbruik).

De roosteroven met aangepast rooster kan de vuilverbranding wel degelijk aan: via sturing van de vooruitschuifbeweging en het debiet primaire lucht kan men de positie van de verbrandingszone regelen en bijsturen. Na de actieve verbranding moeten de verbrandingsresten nog verder worden uitgebrand, door combinatie van voldoende temperatuur en bijkomende lucht en schuring.

4.1.3. Voor- en Nadelen

Sterke en zwakke kanten van roosterovens:

- Bedoeld voor een gekalibreerde, homogene brandstof. De afwijkingen hiervan worden verzacht door de specifieke roosterbouw en werking, door vooraf homogeniseren en door regeling van primaire lucht en roosterbeweging.
- Het rooster dient gekoeld te worden door de primaire lucht of via interne circulatie van water.
- De roosterstaven ondergaan slijtage, oxidatie, verstopping...
- Roosterovens kunnen ook gebruikt worden als vergasser. Deze aanwending gebeurt nochtans nagenoeg nooit. Het dwarsstroomprincipe is minder geschikt voor vergassing.

4.2. Schachtovens

4.2.1. Werkingsprincipe

De verticale oven of **schachtoven** werd al door de Romeinen bedreven: kalksteen werd toen gecalcineerd tot kalk, gebruikt als hydraulisch bindmiddel, een voorloper aldus van cement. Het is niet echt duidelijk of de ovens destijds met droog hout of met houtskool gestookt werden. Het oventype evolueerde naderhand tot de laagoven (Middeleeuwen) en de hoogoven (Moderne tijden) van de **ijzer- & staalnijverheid**:

- IJzererts daalt gravitair naar de haard, gevat tussen lagen cokes en kalksteen.
- De lading droogt en warmt geleidelijk op, in tegenstroom contact met de opstijgende hete gassen, bekomen door onderaan in de haard voorverhitte lucht in te blazen en cokes e.a. brandstoffen te verbranden.
- IJzeroxide wordt dan gereduceerd door koolmonoxide, geproduceerd via de Boudouard reactie:
$$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$$
- Het ruwijzer smelt en vormt een laag metaal die meestal periodiek wordt afgetapt.
- Bovenop het ruwijzer drijft een laag gesmolten slakken, gevormd door de kalk en andere toeslagstoffen. Deze verwijdert bepaalde onzuiverheden uit het ruwijzer, zoals zwavel en fosfor, naast een deel der nuttige elementen (ijzer, mangaan).

Deze slakken worden gevaloriseerd als een hoofdbestanddeel van zgn. hoogovencement. Schachtovens worden eerder weinig toegepast, nl. in de sectoren kalk, de ijzer- & staalnijverheid, en bij het insmelten van schroot tot gietijzer.

4.2.2. Toepassingen in de afvalsector

Schachtovens stonden centraal in het Andco-Torrax proces en het Union Carbide proces. Beide zijn niet langer actief. Ze kregen navolging bij Nippon Steel en enkele andere Japanse confraters.

4.2.3. Voor- en Nadelen

De **hoogoventechniek** heeft als voornaamste kenmerken:

- Een redelijk **eenvoudige oven**, zonder interne bewegende delen,
- Een heel geleidelijke omzetting, met drogen, opwarmen en ontsteken naarmate het afval verder wegzinkt in de schacht. De oven is slechts matig productief!
- Een finale **hoge temperatuur**, meestal 1.100 à 1.400°C.
- De **bodemas** en de metalen worden ingesmolten en elk afzonderlijk afgetapt.

Dit geschiedt periodiek. Het metaal laat men stollen, de slak eveneens, ofwel wordt deze afgeschrikt in een waterbad, tot een verglaasd **granulaat**. Het **metaal** is praktisch waardeloos: het samensmelten van diverse metalen leidt tot een materiaal, dat enkel als **ballast** nog nut kan hebben.

Er zijn ook beperkingen en nadelen:

- Ideaal moet de voeding goed worden **gekalibreerd**: in een echte hoogoven hebben kalksteen, cokes, en erts een welbepaalde afmeting en porositeit. Met (gebroken) huisvuil heeft men deze regelmaat niet, met als gevolgen capaciteitsverlies, onregelmatige verdeling der gassen (schoorsteenvorming, randvuur), etc.
- De **haard** dient bestand te zijn tegen temperatuur, slijtage en aantasting door gesmolten slakken en metalen. Er is dus vuurvaste vormsteen nodig.
- Er is een aanzienlijk verbruik van **cokes** en **toeslagstoffen**, zoals kalksteen en vloeispaat
- De lucht ondergaat een beduidende **drukval**, evenredig met de bedhoogte. Deze drukval verhoogt het eigen elektriciteitsverbruik.
- De rookgassen zijn beladen met **stof**.
- Er vormt zich thermische **NOx**.
- Normaliter worden alle verbrandingsgassen onderaan gevormd. De flexibiliteit eigen aan het dwarsstroomprincipe is niet aanwezig.
- De volumetrische productiviteit (ton huisvuil per m³ ovenruimte en per uur) is vrij gering.

4.3. Roterende Trommelovens

4.3.1. Werkingsprincipe

Roterende trommelovens worden nog niet zolang gebruikt op grote schaal. Ze worden eerder weinig toegepast, nl. in de sectoren cement, kalk, en bij het insmelten van vervuild aluminium schroot. Ze worden ook wel toegepast bij het drogen van vaste stoffen, o.m. diervoeder.

Roterende trommelovens bestaan essentieel uit een lange stalen buis, intern bekleed met isolerende en vuurvaste materialen en voorzien van laad- en losinrichtingen en van de nodige branders. Deze laatste worden opgesteld aan de vaste voor- of achterzijde (respectievelijk in gelijkstroom en tegenstroombedrijf) en verhitte deze ovens. Ze worden elektrisch aangedreven via een reuzentandwiel, gemonteerd op de buitenwand. Ze zijn opgesteld onder een lichte helling, die de voortbeweging van de lading verzekert onder het gecombineerd effect van graviteit en rotatie.

De lading wordt ingebracht langs een stationaire inrichting, waarin de trommeloven vrij kan ronddraaien. Ze wordt telkens weer opgevoerd door de roterende beweging en rolt vervolgens weer naar onder. Dit verzekert een goede doormenging en een oppervlak dat steeds vernieuwt, hetgeen de warmtewisseling met de gasstroom verbetert.

Cement- en kalkovens kunnen heel lang zijn, zelfs meer dan 150m. Ze worden bedreven in tegenstroom: er is dus een warmtewisseling zoals in een hoogoven.

4.3.2. Toepassingen in de afvalsector

Roterende trommelovens zijn 'Allesfressers' bij de verwerking van industrieel afval. Deze techniek werd door BASF voor het eerst ontwikkeld in de jaren '60. Deze ovens zijn heel kort en ze worden normaal bedreven in gelijkstroom. Tegenstroom wordt gereserveerd voor vochtige stromen; het biedt het nadeel dat er anders al licht brand ontstaat in het voedingsysteem.

Roterende trommelovens zijn tevens een eerste keuze in laagtemperatuurs pyrolyseprocessen.

4.3.3. Voor- en Nadelen

De **Roterende trommeloventechniek** heeft als voornaamste kenmerken:

- Een redelijk **eenvoudige oven**, meestal zonder interne bewegende delen,
- Een **goede vermenging** in de **vaste fase**.
- Een **slechte vermenging** en dus uitbrand in de **gasfase**. De roterende verbrandingskamer moet daarom gevolgd worden door een (stationaire) naverbrandingskamer.
- Een finale **hoge temperatuur**, meestal een 1.100°C of meer.
- De **bodemas** kan dan worden ingesmolten.

Er zijn ook een reeks beperkingen en nadelen:

- De trommeloven vereist een **noodstroomaggregaat**: stroomuitval laat de trommelbeweging stoppen, waarna deze trommel thermisch blijvend vervormd wordt.
- De **vuurvaste bekleding** dient bestendig te zijn tegen temperatuur, slijtage en aantasting door gesmolten slakken. Er is dus een goed gekozen vuurvaste vormsteen nodig, ofwel een vuurvast beton.
- De afsluiting tussen bewegende trommel en stationaire voor- en achterzijde zorgt voor dichtingproblemen.
- Er vormt zich thermische **NOx**.
- De flexibiliteit eigen aan het dwarsstroomprincipe is normaal niet aanwezig. Secundaire lucht kan niet of moeilijk worden ingebracht, behoudens in telescopisch opgebouwde eenheden. Wel worden er nu cementovens ook **mid-kiln** met afval gevoed.

4.4. Wervelbed

4.4.1. Werkingsprincipe

Fluidisatie is een bijzondere toestand van een bed gevormd door korrelvormige materialen, die doorstroomd worden door een opstijgende luchtstroom. Naar gelang van het luchtdebiet heeft men achtereenvolgens:

- Een stationaire laag korrels, in geleidelijke **expansie** met stijgend debiet.
- Een fluid bed, vaak ook **wervelbed** genoemd (D = Wirbelschicht). Achtereenvolgens spreekt men bij stijgend luchtdebiet van een beginnende, goed ontwikkelde of heftige fluidisatie. Deze gaat geleidelijk over in
- Een **circulerend fluid bed**, waarbij er eigenlijk minder en minder sprake is van bed en meer en meer van meegesleurde deeltjes. Deze laatste kunnen echter opnieuw worden afgescheiden door cyclonen en naar het bed teruggevoerd. Aldus spreekt men van een circulerend fluid bed.

De term **wervelbed** is stevig ingeburgerd, doch feitelijk foutief: een werveling is namelijk niet in het bed aanwezig. Deze was wel aanwezig in bepaalde roosttechnieken, in zgn. cyclonovens.

Wervelbedtechnieken zijn nog redelijk recent en bleven zelfs heel lang ondoorgrondelijk tijdens hun eerste toepassingen, nl. in de Winkler vergasser (ca. 1924), de Esso Fluid Bed Cracker (na W.O. II), het roosten van nonferro ertsen en pyriet (Lurgi, te Frankfort). Universitair onderzoek maakte de dynamica van deeltjes en gasstromen duidelijker.

Wervelbedtechnieken worden nu veel toegepast bij de droogtechniek, in sommige steenkool of bruinkool gestookte elektrische centrales, en bij het roosten. Fluid Catalytic Cracking doet nu niet langer beroep op fluidisatie, wel op pneumatisch transport.

Wervelbedtechnieken lijken heel eenvoudig. Echter, het behandelen van poeders kan onverwachts problemen opleveren. De firma Prayon bestelde een kolengestookt wervelbed voor haar bedrijfszetels te Prayon en te Puurs, respectievelijk bij C.M.I. en een Engelse dochter van Petrofina. Geen van beide heeft ooit correct gewerkt!

Het verschijnsel fluidisatie

Een laag zand wordt doorstroomd door opwaartse lucht. De laag gaat hierdoor zichtbaar uitzetten. De lucht baant zich een weg tussen de zandkorrels en ondergaat daarbij drukverlies. Dit laatste stijgt steeds verder, samen met het luchtdebiet. Debiet, expansie, en drukval nemen steeds maar verder toe, tot de drukval gelijk wordt aan de druk uitgeoefend door het bedgewicht (= gewicht/doorsnede). Op dat moment krijgt men een toestand van beginnende fluidisatie. Bij nog verdere stijging van het debiet stijgt de druk nog nauwelijks verder: de bijkomende lucht vormt bellen, die dan opstijgen doorheen het bed, uitzetten, en aan het oppervlak uiteenspatten. Het zandbed ziet er nu uit als een kokende vloeistof en vertoont inderdaad een reeks vloeistofeigenschappen:

- Hout drijft boven, steen of metaal bezinkt in het zandbed.
- De wet van de communicerende vaten is geldig.
- Slaat men een gat in de wand, dan vloeit het zand naar buiten.
- Lucht en zand hebben beide een geringe warmtegeleidbaarheid. Met lucht gefluidiseerd zand geleidt echter zo goed, dat een wervelbedoven opvalt door een heel homogene temperatuur.

Deze laatste is eigenlijk het gevolg van een intense vermenging binnen het bed: de opstijgende luchtbellen duwen het zand voortdurend naar boven. Het zand zakt dan weer naar onder in die zones, waarin weinig of geen bellen opstijgen: deze laatste volgen bij benadering steeds weer dezelfde weg (cf. kokend water). De vermenging geschiedt dus enkel in de verticale richting, veel geleidelijker in de horizontale richting. Ebara promoot echter een betere vermenging door in het midden van de oven met weinig lucht en aan de randen met veel lucht te fluidiseren. Samen levert dit een globale stroming, stijgend aan de rand, dalend in het midden. In de praktijk werkt men met 2,5 à 4 maal de minimum fluidisatiesnelheid. Daarbij krijgt men een nagenoeg perfecte vermenging der vaste fase, een snelle warmteoverdracht en een homogene verbrandingstemperatuur.

De lucht volgt twee verschillende wegen: grotendeels als slierten van opeenvolgende en expanderende bellen, met slechts een beperkt contact met het bedmateriaal, en voor het overige tussen de deeltjes in. Een bepaalde bedhoogte (bij voorbeeld 1 m) is aldus wenselijk om de aanwezige zuurstof goed te gebruiken.

4.4.2. Voor- en Nadelen

De wervelbedtechniek heeft vele voordelen:

- Een heel **eenvoudige oven**, zonder interne bewegende delen,
- Een heel **snelle verbranding**, met typisch het drogen, opwarmen en ontsteken in enkele seconden, een volledige uitbrand in één minuut.
- Een heel uniforme, **lage verbrandingstemperatuur**, meestal 800 à 850°C, nagenoeg zonder vorming van thermische NO.

- De **bodemas** is schoongeschuurd door de bewegende zandkorrels. Aldus komt deze bodemas heel netjes voor, veel beter dan bij de meeste oudere roosterovens.
- De oven is heel geschikt om **sterk verschillende stromen** te verwerken, o.m. huisvuil, hospitaalafval, zuiveringsslib, afvalwater, etc.
- De capaciteit kan gemoduleerd worden: indien met de primaire lucht door een deel van de distributor toelaat, dan fluidiseert enkel een deel van het bed. De rest blijft in rust en isoleert thermisch het niet gefluidiseerde, onactieve deel van het bed.
- De eenheid kan heel snel terug opstarten, na een onderbreking. Dit verklaart ten dele de populariteit in Japan: een wervelbedverbranding laat zich zonder veel problemen in slechts één of twee ploegen bedrijven!
- Het bed vormt een thermisch vliegwiel. Men kan een tijdlang vochtig slib of zelfs afvalwater verbranden, zonder al te grote daling der temperatuur.

Er zijn ook beperkingen en nadelen:

- De **primaire lucht** dient te worden verdeeld door een verdeelplaat (distributor). Deze dient zorgvuldig ontworpen te worden en bestand te zijn tegen temperatuur, slijtage, doorsijpelen van zand, en verstopping. Bepaalde componenten van huisvuil (metaaldraden) zijn op dit niveau problematisch.
- De **fluidisatielucht** ondergaat een belangrijke **drukval**, recht evenredig met bedhoogte (in rust) en densiteit van het bedmateriaal. Deze drukval verhoogt beduidend het eigen elektriciteitsverbruik.
- De rookgassen zijn heel zwaar beladen met **stof**. Dit laatste is niet noodzakelijk goed uitgebrand. Bij de verbranding van huisvuil vermindert aldus de hoeveelheid bodemas, terwijl deze van vliegias meerdere malen vergroot.
- Het wervelbed kan leiden tot **erosie**. De zandkorrels vertonen **attritie** en worden uiteindelijk meegesleurd.
- In bepaalde gevallen treedt als gevolg van **agglomeratie** een dramatisch fluidisatieverlies op, nl. wanneer er een begin van smelten optreedt.
- Verwijdering van **bodemas** is bewerkelijk. Extractie is weliswaar mogelijk, maar vergt daarbij het uittrekken van een zandstroom die de hoeveelheid bodemas met een factor 10 overtreft. Dit vereist dan een externe circulatie van zand, dat dan wordt afgezeefd en teruggevoerd.

5. Effecten en randvoorwaarden

5.1. Milieu- en veiligheidsaspecten

5.1.1. Atmosferische emissies

De belangrijkste emissies van thermische processen zijn deze naar de atmosfeer.

De E.U. Regelgeving voorziet analoge grenswaarden voor Verbranding – Vergassing – Pyrolyse.

In het geval van huisvuil komen ALLE processen neer op verbranding, hetzij in één enkele trap, hetzij in meerdere. Men kan dus stellen dat alle thermische processen dezelfde emissies opleveren, vermits ze aan dezelfde grenswaarden moeten voldoen en beroep doen op dezelfde technieken om de rookgassen te zuiveren.

Als argument ten voordele van Vergassing – Pyrolyse wordt wel eens aangevoerd dat deze processen een enigszins lager rookgasdebit opleveren. Dit argument is juist, gesteld dat alle eenheden precies op deze emissiegrenswaarden zouden mikken en daarbij werken. In werkelijkheid zijn de reële emissies niet zelden een factor 2, 5, of zelfs meer lager. Dit ontkracht in ruime mate vermeld argument.

Elke oven wordt erg vervuilend, wanneer hij in overdruk treedt: uit alle ondichtheden komt dan rook te voorschijn. Een argument ten *nadele* van Vergassing – Pyrolyse is dat elke accidentele emissie veel ernstiger gevolgen heeft dan bij verbranding. De rangorde wordt hier aldus

Verbranding > Vergassing >>> Pyrolyse

Tijdens onze bezoeken aan Kawaguchi en Aomori hebben we nagegaan in de elektronische records of deze TwinRec eenheden ooit in overdruk waren getreden. Dit was echter niet het geval. Ook een stroompanne te Kawaguchi kon enige weken voor ons bezoek optreden zonder kleerscheuren.

5.1.2. Waterige emissies

Waterige emissies zijn zeldzaam in de verbranding van huisvuil.

Deze kunnen wel voorkomen bij het reinigen van vergassingsproducten en vooral van pyrolysegassen, hetgeen dan een enorm nadeel vormt: dergelijke waswaters zijn ten eerste vervuild (olie, cyaniden, fenolen, PAKs...) en nauwelijks nog te reinigen. Echter, in de meeste gevallen wordt alles toch verbrand, zonder voorafgaande wassing.

5.1.3. Vaste reststoffen

De verbranding van huisvuil levert hoofdzakelijk 3 reststromen:

- Bodemas, die eerder weinig is gecontamineerd. Deze wordt uitgerijpt en geklasseerd; de diverse fracties worden gerecycleerd.
- Vliegias, die danig is gecontamineerd (dioxines, PAKs, zware metalen). Deze wordt geïmmobiliseerd.
- Neutralisatiezouten, die in big bags worden gestort, ofwel in zoutmijnen ondergebracht.

De twee andere processen leveren analoge stromen op.

Voor wat betreft de bodemas leveren wervelbedprocessen een duidelijk beter resultaat dan de andere oventypes. Wervelbedprocessen wijzigen echter ook de verhouding bodemas/vliegias van een waarde 10/1 (roosteroven) in nagenoeg 50/50 (wervelbedoven). Dit vermeerdert sterk de hoeveelheid te verwijderen gevaarlijk afval!

De mogelijkheden van verglazende processen zijn eveneens zeer goed, voor wat betreft uitzicht en kwaliteit der reststoffen. Beide hebben echter een niet verwaarloosbare meerkost. Deze meerkost vertaalt zich niet in een hogere waarde van het residu (= hoogstens de waarde van zand), wel in lagere storkosten (want deze vallen normaliter weg).

Neutralisatiezouten komen voort uit de rookgasreiniging. Hoeveelheid en kwaliteit variëren met:

- Het rookgasreinigingsysteem.
- De afvalsamenstelling, meer bepaald de hoeveelheid chloor en zwavel.

Er is aldus geen onderscheid tussen de diverse processen.

5.1.4. Dioxines

Dioxines worden vaak opgevoerd als voornaamste argument tegen de verbranding van huisvuil. Echter, de emissies zijn volledig verwaarloosbaar en voortdurend gecontroleerd. Dioxines in rookgassen zijn niet langer relevant.

Dioxines komen wel nog voor in vliegias en – in mindere mate – de bodemas. De eerste worden geïmmobiliseerd en aldus onschadelijk (= niet uitloogbaar) gemaakt. In Japan gaat men een stap verder, door deze dioxines thermisch te vernietigen. Hiervoor werden talloze technieken ontwikkeld, o.m.:

- De Hagenmeier trommel, met een thermische behandeling, typisch 300 à 400°C, 1 à 2 uur, afwezigheid van zuurstof.
- Hoge temperatuursbehandeling, met verslakken, verglazen...

Dioxines ontstaan inderdaad in veel mindere mate bij vergassing en pyrolyse. Pyrolyse levert echter heel wat PAKs e.a. gevaarstoffen op.

5.2. Energierecuperatie

Brandbaar afval kan worden ingezet teneinde warmte op te wekken. Hetzelfde geldt voor biomassa. De mogelijkheden tot energierecuperatie worden nu vergeleken voor verbranding, vergassing, en pyrolyse.

Tijdens onze gedetailleerde studie van het TwinRec proces werden gedetailleerde massa- en energiebalansen opgesteld en tevens een vergelijking gemaakt tussen de energieproductie van een roosteroven en een TwinRec eenheid. Daaruit is gebleken dat sommige factoren in het voordeel van TwinRec uitvallen, andere in het nadeel.

Voordelig zijn:

- De veel lagere hoeveelheid primaire lucht.
- De lage vergassingstemperatuur.
- De hogere intredetemperatuur in de stoomketel.
- De hogere uitbrand van bodemas.
- Het lagere afgasdebiet, hetgeen het verlies aan voelbare warmte reduceert.

Nadelig zijn:

- De vereiste voorbehandeling van het huisvuil (breken, klasseren).
- De drukval over het werfelbed is beduidend hoger dan in een roosteroven.
- De veel hogere hoeveelheid secundaire lucht.
- De belangrijker behoefte aan steunbrandstof.
- De eventuele toepassing van zuurstof bij het smelten.

- De tijden, nodig voor onderhoud zijn beduidend hoger: in plaats van één jaarlijkse grote onderhoudsbeurt worden de Ebara-eenheden 4 à 6 maal per jaar stilgelegd. Dit verlaagt de capaciteit en verhoogt de onderhoudskost per ton.

De globale balans met betrekking tot energierecuperatie is aldus redelijk in evenwicht. TwinRec biedt dus een beduidend voordeel (het verslakken) zonder een beduidende penalisatie: deze kan inderdaad uitblijven in het geval dat de slakkenvloei behouden blijft, zonder dat daarbij beduidende hoeveelheden steunbrandstof en/of aanrijking met zuurstof zijn vereist.

De voornaamste nadelen van TwinRec liggen elders, namelijk:

- Het risico dat deze Japanse techniek niet onmiddellijk lukt met Europees afval. Voornamelijk, de hoeveelheid as kan voor problemen zorgen.
- De beduidend hogere investeringskosten.
- De beduidend hogere werkingskosten.
- De veel geringere beschikbaarheid: een 83% tegenover een 92%.

5.3. Verglazen van vlieg- en bodemassen

5.3.1. Definitie en producten

De vuilverbranding heeft een grote verdienste: afval van alle slag wordt omgezet in (redelijk) stabiele, steriele residu's. Deze komen voor onder meerdere vormen, meer bepaald:

- **Rooster- of bodemas:** in een roosteroven (West Europa) een 20 gew.% van het (nat) huisvuil.
- **Roosterdoorval:** p.m.
- **Aanbakkingen aan ovenwanden:** p.m.
- **Ketelas:** p.m.
- **Vliegas:** in een roosteroven een 2 à 5 gew.% van het huisvuil.

Rooster- of Bodemas

Bodemassas bestaat uit vaste verbrandingsresten (as, metalen, glas, stenen...) en valt van het rooster op het einde van het verbrandingsproces. Ze wordt meestal verwijderd via een natte ontslakker, die belet dat ongewenste lucht de oven intreedt. Bodemas is aldus nat en – niet zelden, vooral in oudere, overbelaste of minder goed werkende eenheden, zwart en onaantrekkelijk. Een betere uitbrand en dus ook een beter brandbaar afval levert betere resultaten. Een hogere verbrandingstemperatuur op het rooster wijzigt de kenmerken van de verschillende componenten:

- **As** sintert samen en vormt aldus steviger en compacter sintels.
- **Glas** verweekt, vervormt en smelt samen met andere componenten.
- **Stalen blikjes** verweken en verplatten. Tin oxideert en diffundeert in het staal. **Koper** cementeert op staal. Aldus vermindert de kwaliteit. 'Verbrand' staalschroot bevat teveel Cu en Sn.
- **Aluminium** smelt (ca. 650°C of lager) en druppelt door het rooster. In de **ontslakker** gaat aluminiumfolie in oplossing.

Bodemassen zijn dus samengesteld uit diverse, goed herkenbare fracties:

- Niet brandbare huisvuilcomponenten, zoals glas en porselein, stenen, beenderen...
- Metalen voorwerpen, nl. stalen conservenblikken, stalen en aluminium drankblikjes, resten van huishoudtoestellen, auto-onderdelen, fietsen, kinderkoetsen, etc.
- As en vulstoffen (papier, plastics...), die niet door de rookgassen werden meegeleurd en in mindere of meerdere mate zijn gesinterd of zelfs samengesmolten.

- Onverbrand, i.e. verkoolde resten van papier of organische stof.

Glas wordt voornamelijk selectief ingezameld.

Metalen voorwerpen wordt afgescheiden (via magneten, overband of in aandrijfrollen, non-ferro via wervelstromscheiders) en verkocht. Verbrand schroot is laagwaardig, maar commercialiseerbaar. Non-ferro is waardevol en wordt best selectief ingezameld, o.m. op containerparken. Hetzelfde geldt eigenlijk voor veel metaalhoudend afval, zoals huishoudartikelen.

Onverbrande residu's kunnen dankzij een correct design van het rooster en de optimale sturing van het verbrandingsproces tot een minimum beperkt worden (typisch 1% van de totale hoeveelheid bodemassen).

Bodemassen worden normaliter gerekend tot de **niet-gevaarlijke reststromen**. Ze worden wel periodiek getest op hun uitloogbaarheid. Na afscheiding der metalen, verouderen (= stabilisatie), eventueel uitloggen en kalibreren verkrijgt men een laagwaardig poreus materiaal, geschikt voor bepaalde bouwkundige toepassingen, o.m. als draineerlaag, afdeklaag, onderbodem voor paden, vulstof in beton of asfalt, e.d.

Vliegas - Stofafscheiding

Vliegas werd eerst meegesleurd door de rookgassen en vervolgens afgescheiden door rookgasreinigingseenheden, o.m.

- Cyclones.
- Elektrofilters.
- Mouwfilters.
- (natte) Waters.

In **Vlaanderen** komen deze stofafscidders alle voor, in diverse configuraties en combinaties (in cascade). Deze zijn geëvolueerd in de tijd, teneinde telkens aan steeds strengere normen te voldoen.

Naast de eigenlijke verbrandingsresten zijn er ook nog de **neutralisatieresidu's**, bekomen door neutralisatie van zure gassen, meestal met gebluste kalk of natriumbicarbonaat. Deze zijn, naar gelang de aard der rookgasreinigingstrein, al dan niet gemengd met vliegas. Ofschoon alle installaties (het waterarme IVRO uitgezonderd) alle ofwel een **natte**, ofwel een **halfnatte** rookgaswassing toepassen, wordt er naar gestreefd om zonder afvalwater te eindigen. Dit kan door het eventuele proceswater aan te wenden bij de bereiding van de kalkmelk en/of de rookgassen voor de wasser of voor de filter te conditioneren door dit afvalwater te vernevelen en te verdampen.

Als beste configuratie (Best Available Technology) wordt nu de **halfnatte neutralisatie** met kalkmelksuspensie aanzien. Deze levert een droog, maar hygroscopisch mengsel van **neutralisatiezouten** (chloriden, sulfaten, fluoriden...). Het bevat steeds een deel der vliegas en, in bepaalde installaties, alle vliegas. Gelet op de verschillende aard en mogelijkheden voor verdere behandeling, c.q. verwijdering, is een scheiding van beide stromen (neutralisatiezouten, vliegas) het aanbevelen waard.

Een volwaardig alternatief biedt de toepassing van bicarbonaat, die zoals reeds eerder aangehaald meerdere bedrijfsvoordelen biedt, zoals een zuiniger verbruik, recycling van de reststoffen, en veel minder bedrijfsstoornissen.

Vliegas – Hoeveelheid en Samenstelling

Vliegas wordt door de 'primaire' verbrandingslucht meegesleurd vanuit de brandende laag huisvuil. Vliegas wordt in veranderlijke mate doorspekt door verkoolde deeltjes papier en roet. Deze hoeveelheden waren vroeger veel omvangrijker dan in moderne eenheden. In recente installaties wordt de verbranding bedreven met een 'juistere' hoeveelheid

lucht, wat het meesleuren van vlieggas beperkt. Aldus verminderde deze hoeveelheid van een 5 gew.% (1970) naar een 2 gew.% (nu).

Tenslotte dient de vlieggas als receptor voor:

- De stoffractie van huisvuil, of liever de as hieruit.
- Vluchtige zouten, hoofdzakelijk NaCl en KCl.
- Vluchtige zware metalen, gesublimeerd door de verbranding, ofwel mechanisch meegesleurd (pigmenten). Het gaat voornamelijk om zink, lood en koper, met daarnaast ook kleinere hoeveelheden kwik, cadmium...
- PAKs en dioxines.

Omwille van de aanwezigheid van gevaarlijke zware metalen en dioxines dient de finale verwijdering van vlieggas met de nodige zorg te gebeuren. Daarbij kan men denken aan:

- Opbergen in zoutmijnen (in Duisland) of stortplaatsen met een overtuigende geologische barrière, zoals de Ieperse of Boomse kleilagen.
- Solidificatie + immobilisatie in erkende centra, zoals Indaver, Sobry (Shanks), ...
- Thermische behandeling door verglazen, al dan niet met recuperatie van metalen.

5.3.2. Verglazen van Vlieggas

De glastoestand der materie

Het woord 'glas' verwijst naar een amorf (d.i. niet kristallijne) toestand der materie, die meestal bros en min of meer transparant is. Deze toestand wordt meestal verkregen via een vrij snelle afkoeling uit een smelt, waarbij dan kristallisatie uitblijft. Glas is aldus te beschouwen als een metastabiele, onderkoelde vloeistof.

Gebruikelijk glas heeft silica (SiO_2) als basisbestanddeel. Dit komt veel voor in de natuur, onder de vorm van zand, kwarts, en – samen met andere oxiden, zoals Al_2O_3 , CaO , MgO ... - in allerlei silicaatmineralen, o.m. klei.

Zuiver silica (SiO_2) vertoont een heel hoog smeltpunt. Dit laatste wordt verlaagd door nagenoeg elke toevoeging van vreemde oxiden. Deze van Na_2O of K_2O is heel effectief, maar leidt tot wateroplosbaar waterglas. De oplosbaarheid wordt dan sterk herleid door het inbrengen van CaO . Gewoon glas wordt vervaardigd door samensmelten van hoofdzakelijk SiO_2 , CaO , en soda (Na_2CO_3). Sporen andere oxiden kleuren dan het glas. Breukglas wordt meestal aan de grondstoffen toegevoegd, omdat het smeltpuntverlagend werkt. In glasovens wordt de warmte in de rookgassen naar de oven teruggevoerd, door voorwarmen van verbrandingslucht en eventueel het aardgas.

De diverse oxiden komen vanzelf voor in nagenoeg alle verbrandingsresidu's, uiteraard in verhoudingen, die niet of slechts weinig controleerbaar zijn. Bij het verslakken, insmelten en verglazen kan aldus de toevoeging van smeltmiddelen nuttig zijn. Ook kan men via toeslagen het smeltpunt trachten te verlagen. IJzer leidt tot laagsmeltend silicaat.

Principe - voor- en nadelen

Vlieggas kan verglaasd worden, o.m. in een 'ad hoc' elektroboogoven, ook wel plasma-oven.

In Europa is Europlasma gespecialiseerd in deze techniek, die evenwel nog nergens op commerciële schaal werd getest. Door de andere milieueisen zijn dergelijke installaties in Japan zeer verbreid. Japan beschikt terzake over heel wat verschillende verglazingstechnieken, die er ook operationeel zijn.

Voordelen van het verglazen zijn legio:

- PAKs en dioxines worden thermisch vernietigd.

- De secundaire vlieggas wordt nu kleinschalig gevormd, nl. als een fractie van de voeding; de hoofdmoot wordt tot een glas samengesmolten.

Nadelen zijn:

- Zouten en zware metalen verdampen en vormen nog een secundaire vlieggas, een nog niet bekende stroom in Europa (wel in Japan).
- Kostprijs, elektriciteitsverbruik, vereisten aan cokes, smeltmiddelen... (variabel, naar gelang van het toegepaste proces).

Op de keper beschouwd wordt de vlieggas (een gevaarlijk afval) omgezet in ongeveer evenveel glas, en een secundaire vlieggas, verder aangerijkt in metalen en anders minder gevaarlijk (lager in, niet noodzakelijk vrij van dioxines).

Tabel 6 Enkele voor- en nadelen van het verglazen van vlieg- en bodemmassen

Voordelen van verglazing	Nadelen van verglazing
<ul style="list-style-type: none"> • Compact - Minimaal restvolume • Gemakkelijk te behandelen • Geringe uitloogbaarheid van zware metalen • Geen dioxines meer 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge kostprijs, een 500€/ton vlieggas • Technisch moeizaam proces, met strenge eisen aan vuurvast, onderhoud, etc. • Lage waarde van de bekomen bouwstof: vervangt zand in bepaalde toepassingen • Secundaire verontreiniging (vlieggas)

Eigen ervaring

De eigen ervaring beperkt zich tot het begeleiden als co-promotor van een doctoraatsthesis aan de T.U.-Eindhoven van een Zwitsers student, de Heer Dr. Arjen Steiner. Deze was werkzaam bij het grootste ‘float glass’ bedrijf ter wereld, een Saint Gobain-onderneming nabij Keulen. Bedoeling was: vlieggas uit de vuilverbranding om te zetten in een commercieel Foamglass. Hij beperkte zich tot overigens heel verdienstelijke laboratoriumtesten. Commerciële inspanningen van Ebara vanuit Tokyo, begeleid door Dr. Christian Steiner vanuit Zurich. Echter, aan deze initiatieven kwam na jaren samenwerking een abrupt einde. Na het leveren van een Waste to Energy plant voor de voormalige Hoechst site te Frankfurt leidde de escalatie in mechanische constructie tot monsterverliezen. De betrokken divisie van Ebara staat nu in het uitstalraam!

5.3.3. Recuperatie van metalen uit vlieggas.

Gesteld dat 1 M ton huisvuil wordt verbrand, dan levert dit jaarlijks een 20.000 ton vlieggas. Deze bevat een 2% zink, 1% lood en tot 0,1% koper, hetzij (alles in ronde getallen):

- 400 ton zink
- 200 ton lood
- 20 ton koper.

Geen enkel metallurgisch bedrijf kan hiermee werken.

Als coördinator van een E.U.-project UPCYCLE hebben we hiervoor een proces ontwikkeld, in opdracht van Sulzer Chemtech (Winthertur, CH; Ravensburg, D) met medewerking van TNO (Apeldoorn, NL) en TU (Claustal-Zellerfeld, D). Bedoeling was de metalen te recupereren en de vlieggas te zuiveren, van o.m. PAKs en dioxines. Onze raming voor de kostprijs was 500€/ton, hetzij een supplementaire kost van 10 à 15 €/ton huisvuil.

Het proces wordt nu aangeboden onder de naam Fluapur[®] door Austrian Energy, na overname van Sulzer Chemtech.

6. Besluiten

6.1. De principes

De inzameling en verwijdering van stedelijke afvalstoffen in het algemeen en van huisvuil in het bijzonder neemt een grote hap uit de gemeentelijke budgetten, samen met onderwijs, aanleg en onderhoud van wegen, etc. Het is dus belangrijk om met de beschikbare middelen zuinig om te springen. Echter, dit laatste mag niet ten koste gaan van een aantal andere overwegingen, waarvan de belangrijkste zijn:

- De Volksgezondheid.
- Het Leefmilieu.
- Duurzame Ontwikkeling, met inbegrip van een zuinige omgang met grondstoffen en energie.

Jammer genoeg zijn deze factoren niet altijd meetbaar of becijferbaar. Dit leidt dan vaak tot een soort overdrijving, in vergelijking met de gangbare economische factoren. Op basis van laagste prijs zou men het storten een groter gewicht geven, al ware dat een hypothekeren van onze beperkte leefruimte. Bij onze vuilverbranding zou men meestal afzien van energierecuperatie, mochten er geen groene stroomcertificaten worden toegekend, want de kostprijs van de teruggewonnen energie overtreft beduidend diens marktwaarde. Op dezelfde wijze is het recycleren van verpakkingen door Fost Plus een heel kostbaar verhaal...

6.2. De technieken

Thermische technieken hebben heel wat met elkaar gemeen. Het grootste deel van afvalvolumes gaat over in de gasfase. De hoge temperaturen steriliseert het residu dat overblijft. Echter, doel, middelen en gevolgen zijn beduidend verschillend, zoals blijkt uit volgende Tabel 7.

Tabel 7 Technieken van thermische afvalverwijdering

Techniek	Verbranding	Vergassing	Pyrolyse	Productie van brandstof
Doelstellingen	Verwijderen van afval met maximale energie- en grondstoffenrecuperatie en minimale milieu-impact	Productie van brandbare gassen	Productie van brandbare gassen en chemische grondstoffen	Opwerken van afval tot brandstof voor het voeden van specifieke verbrandingsprocessen
Conversie in	Reine rookgassen en steriel residu	Brandbare gassen	Brandbare gassen, vloeistoffen en vaste stoffen	Meer homogene brandstof, lager in vocht en as
Oventypes	Roosteroven Wervelbed	Wervelbed Schachtoven	Draaitrommeloven	Elektrische centrales, cementovens, industriële stookinstallaties

Roosterovens voor de huisvuilverbranding hebben nu een 80 jaar ervaring. Dit betekent dat de kinderziekten nu wel achter de rug zijn en dat deze techniek in West Europa als B.A.T. aangemerkt kan worden. In Tabel 8 wordt er schematisch een overzicht weergegeven van de meest voorkomende oventypes ingezet voor de thermische verwerking van huisvuil.

Tabel 8 Enkele veel verbreide oventypes

Oventype	Roosteroven	Wervelbedoven	Schachtoven	Roterende oven
Toepassingsgebied	Huisvuil en gelijkgesteld bedrijfsafval	Nagenoeg alle denkbare afvalstromen	Bij voorkeur afval met relatief constante afmeting	Nagenoeg alle denkbare afvalstromen
Voorbehandeling	Vermengen (huisvuil)	Verkleining essentieel	Verkleining essentieel	Vermengen
Beweging vuil vs. lucht	Dwarsstroom	Dwarsstroom	Tegenstroom, maar gelijkstroom en dwarsstroom mogelijk	Gelijkstroom maar ook tegenstroom mogelijk

6.3. De processen

6.3.1. Verbranding

Vandaag is de huisvuilverbranding een beproefde techniek, die nog steeds verder verbetert. Nieuwe installaties kunnen meer en beter dan oudere. Grotere installaties kosten relatief minder in investering, bedrijf- en onderhoudskosten (€/ton huisvuil) dan de kleine, verspreide eenheden, die Vlaanderen rijk is. Uit de voorgaande opsomming (Tabel 1) blijkt wel duidelijk dat de vuilverbranding met voor- en nadelen is behept, maar alleszins voorspelbaar en betrouwbaar haar taak vervult.

Door steeds verdere eisen zijn de inzameling en verwijdering van afval steeds complexer en duurder geworden, nieuwe sites slechts heel moeilijk aan te duiden en nieuwe projecten lopen veel vertraging op. Openbare geldmiddelen zijn niet onbeperkt beschikbaar: wat de vuilafvoer meer kost, is minder beschikbaar voor Onderwijs, Justitie, of Cultuur! Er wordt dus meer geld geïnvesteerd dan politiek verantwoord, m.a.w. dezelfde investeringskosten zouden meer baat brengen ook in andere zuiveringsinstallaties, o.m. in de sectoren cement of metallurgie.

Internationaal actieve actiegroepen hebben echter systematisch een vertekend beeld van de vuilverbranding opgehangen. De politieke keuze voor vuilverbranding situeert zich aldus steeds meer in sociale en emotionele sferen, steeds minder in een rationele technische en economische context. Dit alles belet niet dat de bouw en werking van nieuwe eenheden in de vuilverbranding inderdaad **hinder** zal meebrengen, in de eerste plaats de trafiek verbonden aan de aanvoer van huisvuil en de afvoer van reststoffen. De blootstelling aan emissies is aanwijsbaar geringer dan deze, afkomstig van stortplaatsen en compostbedrijven, van het roken binnenshuis, of van industriële installaties. Bij een **milieueffectrapportering** worden deze factoren voor elke verontreiniging afzonderlijk becijferd. Meestal blijft de bijkomende immissie (dus wat effectief wordt ingeademd) beneden de 1% van de achtergrondwaarde. Echter, het verschil tussen gunstige en minder gunstige weersvoorwaarden (krachtige wind t.o.v. inversie) bedraagt een factor van minstens 100!

Nadelige gevolgen van de anti-huisvuilverbranding gevoelens zijn het creëren bij de modale burger van onrealistische verwachtingen, te vervullen door recycling en door alternatieve thermische technieken (vergassing, pyrolyse). Het eerste struikelt over de beperkte afzet- en marktmogelijkheden geboden door recycling: recyclage van oud papier en kunststoffen zijn in beperkte mate doenbaar zonder overdreven kwaliteitsverlies. De tweede zijn technisch heel moeilijk realiseerbaar. Na talloze mislukkingen is enkel Japan er in geslaagd om dergelijke vergassings- en pyrolyseenheden continu in bedrijf te houden.

6.3.2. Vergassing

Het vergassen van huisvuil is een moeizame, maar technisch uitvoerbare techniek. Het is niet mogelijk om op economisch aanvaardbare wijze uit huisvuil een waardevol gas te bekommen. Echter, een brandbaar gas leveren aan een permanente en niet te veeleisende afnemer is wel doenbaar. Mogelijke standplaatsen voor een vergasser van huisvuil zijn o.m. naast een elektrische centrale, cementoven, chemische synthese industrie.

De meeste voorstellen baseren zich dus op *wishful thinking* en wel op volgende vlakken:

- **Kwaliteit van het gas.** Uit steenkool of kunststofafval kan men een goed gas bereiden. Uit huisvuil kan men enkel een gas met veranderlijke kwaliteit en verontreiniging produceren.
- **Toepassingen.** Men hoort veel over gasmotoren, gasturbines e.a. hoogdravende toepassingen. Echter, deze tuigen aandrijven met vuil gas is onmogelijk. Vuil gas zuiveren is omslachtig en duur. **Thermoselect** belooft in zijn prospectus allerlei mooie toepassingen. Op het terrein (te Karlsruhe of bij Kawasaki Steel) kwam het echter enkel tot een meertraps, complex verbrandingsproces. De geroemde nevenproducten bleven uit!
- **Kostprijs.** Wie het risico neemt nieuwsoortige processen te bedrijven betaalt altijd heel veel leergeld.

De vraag stelt zich in welke mate de lokale overheid er belang bij heeft om beroep te doen op onbewezen of geïmporteerde technieken bij het vervullen van haar opdrachten i.v.m. Openbare Reiniging en Afvalverwijdering. Zelfs 20 jaar na het nemen van een foutieve beslissing, betaalden de burgers te Grasse (departement Alpes-Maritimes) nog steeds leningen terug!

6.3.3. Pyrolyse

Er zijn geen gangbare pyrolyseprocessen voor huisvuil, behoudens in Japan. Deze werken nog niet goed en kunnen dus niet worden aanbevolen. Op basis van milieuoverwegingen zijn pyrolyseprocessen niet bepaald aan te bevelen, vermits een brede waaier van erg gevaarlijke en milieubelastende stoffen bij de pyrolyse *onvermijdelijk* ontstaan. Historisch vormden de pyrolyseprocessen immers een bron van zwaar gecontamineerde sites, nl. alle voormalige cokes- en gasfabrieken.

Een tweede belangrijke reden om niet voor pyrolyseprocessen te opteren is de hogere complexiteit van deze installaties, als gevolg van de noodzakelijke externe warmtetoevoer. Loopt er al iets mis, dan worden de emissies van een pyrolyse-eenheid niet alleen veel vervuilender, maar ook nog explosie- en brandgevaarlijk.

Een derde reden om pyrolyseprocessen af te wijzen is de afwezigheid van producten met enige toegevoegde waarde. Gas, teer, en verkoeld residu zijn niets waard, behoudens wanneer uitgegaan wordt van een goed bekende grondstof. Echter, zelfs de kunststoffenpyrolyse krijgt het in Japan steeds moeilijker, wegens de onzinnige kostenstructuur, oorspronkelijk met een gate fee van een 100.000 Yen/ton, of een 8.000 €/ton kunststoffen.

Pyrolyseprocessen staan nog niet gans op punt, zoals blijkt uit de weigering van Hitachi Zosen om hun pyrolyseproces nog aan te bieden, vooraleer alle kinderziekten zijn uitgewerkt en nuttig opgelost. Dit laatste blijft problematisch, zoals hierboven uiteengezet.

7. Algemeen Besluit

In deze studie worden de toepassingsmogelijkheden vergeleken van Verbranding, Vergassing, en Pyrolyse bij de verwerking van huisvuil en gelijkgesteld afval. Bij deze vergelijking zijn eveneens relevant de Tabellen:

Tabel 1 - Enkele voor- en nadelen van Vuilverbranding	
Tabel 2 - Voornaamste technieken der vergassing	16
Tabel 3 - Modelsamenstelling van diverse types synthesegas.	16
Tabel 4 - Enkele voor- en nadelen van Vuilvergassing	18
Tabel 5 - Enkele voor- en nadelen van Pyrolyse	21
Tabel 6 - Enkele voor- en nadelen van het verglazen van vlieg- en bodemassen	33
Tabel 7 - Technieken van thermische afvalverwijdering	34
Tabel 8 - Enkele veel verbreide oventypes	35

7.1. Verbranding vs. Vergassing en Pyrolyse

7.1.1. Uitvoerbaarheid

Verbrandingsprocessen voor huisvuil en gelijkgesteld afval zijn vandaag in de E.U. 'Stand der Techniek'. Ze worden normaliter uitgevoerd met behulp van een **roosteroven**: de **dwaarsstroom** tussen huisvuil en primaire lucht laat toe deze laatste ideaal te moduleren. Deze techniek is nu heel gangbaar sedert de jaren '30: er is dus 80 jaar ervaring, aanpassing en verbetering voorhanden!

Vergassingsprocessen van huisvuil en daaraan gelijkgesteld materiaal zijn zeker technisch uitvoerbaar, zowel met een schachtovenproces (Nippon Steel) als in een wervelbed (Ebara). Ze vinden enkel toepassing in Japan, ingevolge bijkomende eisen gesteld aan de vuilverbranding. Beide processen realiseren een **verglazing** van de slak (Nippon Steel) en/of de vlieggas (Ebara). Beide bieden bovendien de mogelijkheid om ook de andere stroom voor een beduidend deel te verglazen, na het terugvoeren ervan in de oven, als bijvoorbeeld vliegas-pellets in de schacht (Nippon Steel) of na fijn vermalen van bodemas (Ebara).

Vergassingsprocessen voor huisvuil en gelijkgesteld afval komen in principe neer op een **tweetraps-verbrandingsproces**, al dan niet met slakkensmelt. Als een 'echt' vergassingsproces, met gas als output, is hun inzetbaarheid beperkt tot heel weinig sites, zoals bijvoorbeeld chemie-sites te Antwerpen, Rotterdam, en Ludwigshafen, de Esso petroleumraffinaderij te Antwerpen (waterstof voor de ontzwaveling), een cementklinker fabriek (Lixhe, Obourg...), kalkovens (de Maas), een elektrische centrale (Genk-Langerlo, Ruijten), etc. Echter, de industriële partners zijn niet of enkel tegen een substantiële vergoeding geïnteresseerd aan deze mogelijkheid.

De **vergassingsprocessen** voor huisvuil en gelijkgesteld afval zijn nog **niet bewezen** onder Europese werkingsvoorwaarden en een technologietransfer is in deze bedrijfssector een hachelijke onderneming². Dit laatste blijkt duidelijk uit de Europese Ebara ervaring met wervelbedverbranding. Ebara is trouwens niet langer bereid om nog in Europa te leveren.

Pyrolyseprocessen voor huisvuil en gelijkgesteld afval zijn vandaag in de E.U. volkomen zinloos: ze zijn complexer, duurder, gevaarlijker, en nadeliger voor het milieu dan de directe

² Dit geldt a fortiori voor pyrolyseprocessen.

of tweetrapsverbranding. Niet alleen dienen ze geen enkel zinnig doel, maar ook de procesvoering gaat ook in Japan nog gebukt onder allerlei kinderziekten.

7.1.2. Milieu- en veiligheidsaspecten

Pyrolyseprocessen zijn niet verantwoord vanuit een milieu- en veiligheidsoogpunt.

In beide andere gevallen (verbranding en vergassing) is belangrijk dat de eigenlijke oven onder alle omstandigheden bij onderdruk wordt bedreven. De gevolgen van een afwijking zijn enkel hinderlijk (rook en stof) in het geval van verbranding; in dat van vergassing zijn ze gewoon gevaarlijk (giftig koolmonoxide; brandbare gassen, die met lucht explosieve mengsels vormen).

De hoge kost der rookgasreiniging (samen met het aspect 'ketelrendement'; zie verder) drijft de constructeurs er toe om meer en meer de hoeveelheid verbrandingslucht te beperken, wat meteen ook de hoeveelheid rookgassen begrenst. Institutioneel is er een hindernis geschapen door de E.U., door de constructeurs er toe te dwingen met minstens 6 vol.% zuurstof te verbranden. Deze regel brengt weinig of niets bij en penaliseert onnodig deze verbrandingsprocessen, die het met minder zouden kunnen stellen!

De vergassing levert potentieel minder CO- en TOC-pieken op en kan ook lager uitvallen in dioxinevorming. Het eerste is te danken aan de verzorgde naverbranding. Het tweede is niet a priori gegarandeerd bij de (gebruikelijke) tweetrapsverbranding.

In Japan wordt overigens opgelegd de vliegase thermisch te verglazen. Deze ingreep biedt bepaalde principiële milieuvordelen (recuperatie van ca. 60 à 80% der vliegase als een soort zand, destructie dioxines, concentratie zware metalen in een kleinere reststroom). Daartegenover staat uiteraard het kostenplaatje, de veel moeilijker bedrijfsvoering³, de beduidend frequenter bedrijfstillstanden, en – niet in het minst – het meerverbruik aan energie.

Samenvattend *kunnen* vergassingsprocessen een licht voordeel opleveren op milieuvlak. Dit weegt evenwel niet op tegen hun nadelen op veiligheidsvlak. Dit laatste argument krijgt hier een doorslaand gewicht ingevolge de grotere kans op bedrijfsstoringen.

7.1.3. Energierecuperatie

Een gedetailleerde vergelijking is enkel mogelijk op basis van concrete projectgegevens. De kwaliteit van de Energierecuperatie wordt namelijk bepaald door talrijke keuzefactoren, zoals:

- De kwaliteit van de uitbrand.
- Het ketelrendement + de evolutie als gevolg van vervuiling.
- De gekozen thermodynamische cyclus en de procesvoorwaarden.
- De warmteverliezen van de eenheid.
- De schoorsteenverliezen.

³ SCK was niet in staat om te Mol de Lacoray/Dr. Wotschke Flammenkammerofen behoorlijk te bedrijven.

De vergassingsprocessen kunnen hier licht beter scoren, in geval van een lage temperatuursvergassing, en een naverbranding met geringe luchtvermaat. Het verschil zou zelfs een paar procent kunnen bedragen⁴.

Echter, de hiervoor vermelde Japanse processen verslakken een deel der as. Ze doen daarbij beroep op steunbrandstof, zuurstof, vloeimiddelen en cokes. In de balans komt het aldus normaliter tot een lichte mali voor deze verslakkende vergassingsprocessen. Zonder de eis tot verslakkings en verglazing zouden deze Japanse processen niet vergassen, maar rechtstreeks verbranden.

7.1.4. Grondstoffenrecuperatie

Ook hier hangt heel veel af van de concrete uitvoering.

Recycling van **bodemas** is 'Stand der Techniek' bij de vuilverbranding. Nog betere resultaten zijn mogelijk met wervelbedprocessen. Echter, deze leveren meerdere malen meer vliegias dan de overige processen.

Nippon Steel vergassing verglaast deze bodemas. De Toegevoegde Waarde hiervan is verwaarloosbaar: gesinterd of verglaasd, de bodemas is in beide gevallen normaal valoriseerbaar. Verglazing werkt mogelijk zelfs nadelig in contact met beton, op basis van de alkali-glasreactie.

Verwijdering van **vliegias** is een noodzakelijk kwaad, maar neemt geen problematische afmetingen aan. In België bestaan er reeds 3 immobilisatie-eenheden (Indaver, ex-Sobry, Ile Monsin). In Duitsland kijkt men er naar uit: als vulstof voor zoutmijnen wordt deze vliegias zelfs gegeerd!

Nippon Steel kent dezelfde problematiek als de vuilverbranding.

Ebara heeft een verglazing voorzien van deze deelstroom; echter, er ontstaat nog een secundaire vliegias. Deze wordt ten dele nog gerecycleerd in de Kawaguchi eenheid. Een uitgaande deelstroom is nochtans nodig om zouten uit het systeem te sluisen.

Uit de bodemas worden de **magnetische metalen** afgescheiden. Met wervelstroomscheiders worden ook de meer waardevolle **non-ferrometalen** gerecupereerd.

Nippon Steel smelt alle metalen samen; het resultaat is enkel nog als tarra bruikbaar.

Ebara vergassing levert hier het beste resultaat, omwille van de reducerende voorwaarden en de lage vergassingstemperatuur.

Grondstoffenrecuperatie kan een reden zijn om de voorkeur te geven aan een laagtemperatuursbehandeling, bijvoorbeeld door pyrolyse of vergassing. Deze reden weegt enkel door in die gevallen, waarin de ingaande stroom beduidend met metaal is beladen. Voor huisvuil is dat niet het geval.

7.1.5. Financiële afwegingen

Gelet op de hogere complexiteit is een logische verwachting, qua vereiste investeringen én werkingskosten:

Verbranding < Vergassing < Pyrolyse

⁴ Meer is mogelijk in de (niet realistische) hypothese van een gasturbine, een gasmotor, etc. Deze mogelijkheden zijn nog nooit met goed gevolg gedemonstreerd.

Echter, gedurende een offerteaanvraag zijn er over het algemeen grote verschillen tussen de diverse aanbiedingen. Onze voorzichtige verwachtingen zijn: (basis 100 = verbranding) vergassing = 130 à 150. Deze waardering lijkt voldoende realistisch, maar ze omvat geen marge voor veel grotere kansen voor technisch falen.

Het overbrengen van een Japanse techniek naar Belgische toestanden brengt een beduidend technisch en cultureel risico mee. Bijkomende investerings- en aanpassingskosten zijn niet uit te sluiten. Dit is dus te dekken door een passende verzekering!

7.1.6. Algemeen Besluit Verbranding – Vergassing - Pyrolyse

Pyrolyseprocessen zijn vanuit de standpunten milieu en veiligheid niet te verantwoorden. Voordelen bestaan er enkel op papier en werden nog nooit technisch waargemaakt. Hun uitvoerbaarheid blijft nog globaal onbewezen, ook in Japan.

Het profiel van **verbranding en vergassingsprocessen** is in vele aspecten min of meer gelijkwaardig, met relatief kleinere plus- en minpunten aan beide zijden.

Theoretisch kunnen vergassingsprocessen een lichte voorkeur genieten op de vlakken *milieu* en *energierecuperatie*. Dit voordeel wordt teniet gedaan door de bijkomende *veiligheidsproblemen* van vergassingsprojecten en – nog veel meer - het *onbewezen karakter* van nagevoeg alle processen onder Belgische bedrijfsvoorwaarden.

7.2. Wervelbedovens vs. Roosterovens.

Een tweede dilemma geldt voor de keuze Wervelbedovens vs. Roosterovens.

7.2.1. Uitvoerbaarheid

Roosterovens waren heel gangbaar bij de verbranding van alle vaste brandstoffen. Nu wordt aan de verbranding van poederkool (cf. Centrale te Langerlo) de voorkeur gegeven, eens de schaal echt groot wordt.

In de E.U. zijn roosterovens nog steeds ‘stand der techniek’ bij de verbranding van huisvuil. Enkel in Scandinavië worden wervelbedeenheden bedreven.

Wervelbedovens worden redelijk algemeen thermisch toegepast:

- Bij de verbranding van zuiveringslib
- In de pulp- en papiersector.
- Bij het roosten van sulfide-ertsen.

De wervelbedverbranding van huisvuil is uitvoerbaar in de E.U., voor zover aan volgende factoren voldaan wordt:

- voldoende mechanische voorbereiding, i.e. breken, klasseren, ontijzeren van het vuil.
- toereikende externe circulatie van zand, teneinde de bodemas (en metalen) te verwijderen. De ervaringsfactor ligt bij 10 delen zand per deel bodemas.

Deze factoren maken de wervelbedverbranding en –vergassing oneconomisch voor huisvuil in de E.U.: de totale hoeveelheid as ligt in Japan bij 5 à 10 gew.%; in de E.U. dient men met 20 à 30 gew.% te rekenen!

7.2.2. Milieu- en veiligheidsaspecten

Het wervelbed levert als pluspunten:

- De bodemas is netter en beter uitverbrand.
- De metalen zijn netter en beter recupereerbaar, vooral dan bij vergassing (560 à 580°C, tegen 630 à 680°C bij verbranding).
- Er wordt geen thermische NO gevormd.
- (Enkel vergassing): de vlieggas kan tijdens de naverbranding worden ingesmolten.

Het wervelbed levert als **minpunten**:

- De hoeveelheid af te scheiden stof is meerdere malen hoger, ten nadele van bodemas. Deze vlieggas is een gevaarlijk afval en vergt bijkomende behandeling.
- (Enkel verbranding): de dioxinevorming kan onverwachte proporties aannemen, ingevolge de hoeveelheid vlieggas en een hogere concentratie van katalytisch koper, door attritie van koperdraad in het bed (cf. problematiek te Gien, Frankrijk).

Intrinsiek is er weinig verschil inzake veiligheid voor wat betreft het thermisch gedeelte. De wervelbedtechniek vereist bijkomende aandacht voor explosie- en brandbeveiliging bij de voorbereiding van het vuil. Deze laatste is overbodig in roosterovens.

Milieu- en veiligheidsaspecten zijn normaliter niet de bepalende factor bij de keuze tussen beide technieken.

7.2.3. Energierecuperatie

Er zijn nauwelijks verschillen tussen roosterverbranding en wervelbedverbranding voor wat betreft het rendement van het ketelgedeelte en de turbo-alternator.

Het eigenverbruik is wat hoger bij de wervelbedverbranding (drukval over het bed; noodzakelijke voorbereiding van het vuil).

Energierecuperatie is normaliter niet een bepalende factor bij de keuze tussen beide technieken.

7.2.4. Grondstoffenrecuperatie

Grondstoffenrecuperatie is normaliter niet een bepalende factor bij de keuze tussen beide technieken, toegepast op huisvuil: immers beide verbrandingstechnieken leveren reststoffen, waarvan de verdere scheiding 'ad hoc' wordt ontworpen en gedimensioneerd.

Een pluspunt van een wervelbed ligt in de mogelijkheid om grotere en zwaardere elementen, o.m. metalen te laten bezinken en af te scheiden. Wervelbedeenheden zijn ook gangbaar voor het reinigen van metalen door thermische verwijdering van coatings, verven en lakken.

7.2.5. Financiële afwegingen

De wervelbedtechniek is duurder omwille van de vereiste voorafgaande voorbereiding van het vuil; er is ook bijkomend personeel en onderhoud vereist bij de voorbereiding van het vuil.

De wervelbedtechniek vergt meer eigenverbruik (van elektrische stroom). Hetzelfde geldt voor verslakkende processen (veel meer onderhoud, bijkomende kosten voor steunbrandstof, zuurstof, etc.).

7.2.6. Algemeen Besluit Wervelbedovens vs. Roosterovens

De vele voordelen van een wervelbed komen nogal sterk tot uiting bij de slibverbranding (geen bodemas) en bij de verbranding van hoogcalorisch afval + nat afval (Sleco, te Beveren), afvalwaters, of ook heel variabele stromen. Wervelbedovens worden weleens verkozen, omwille van een hoge flexibiliteit en de mogelijkheid te werken bij een ongewoon lage temperatuur.

Voor huisvuil is de wervelbedverbranding enkel in Japan een optie. Dit laatste volgt duidelijk uit de ervaringen bij Tiru/EdF te Gien (Département du Loiret) en bij Novergie/Sita te Sausheim, waar men telkens enkel na een tiental jaar en bijkomende investeringen in de voorbereiding van het vuil de Ebara verbrandingstechniek heeft gemeesterd.

7.3. Aanbevelingen

Pyrolyse, vergassing, en wervelbedtechnieken zijn in Japan heel wat meer verbreid. Echter, elke extrapolatie van Japanse naar Europese toestand loopt mank, omwille van verschillen in de afvalsamenstelling, het voorsorteren en aanleveren, de structuur van bedrijfs- en investeringskosten. In Japan kost de grond normaliter meer dan de installaties, die er bovenop gebouwd worden!

Onze aanbevelingen zijn:

1. Voor thermische installaties kunnen **enkel beproefde oplossingen** naar voor geschoven worden. Er zijn voldoende ongelukkige voorbeelden van vermetele vooruitstrevende keuzes, die dan op een ramp of op enorme moeilijkheden zijn uitgelopen.
2. **Pyrolyse-installaties** voor huisvuil of gelijkgesteld zijn een **onzinnige keuze**, want:
 - a. milieugevaarlijk.
 - b. brand- en explosiegevaarlijk.
 - c. waardeloze, maar gevaarlijke producten.
 - d. zelfs in Japan, na 10 à 15 jaar ontwikkeling en toepassing, nog een probleembedrijf.
3. **Vergassingsinstallaties** zijn reeds stukken realistischer, ook al komt het enkel tot een **tweetrapsverbranding**, in Japan met insmelten en verglazen van de as. De marktleider, Ebara Co., is echter niet bereid om in Europa dergelijke installaties te bouwen!
4. **Wervelbedinstallaties** zijn niet geschikt voor brandstoffen, c.q. afvalstoffen, die meer dan een 3 à 5 gew.% bodemas opleveren. Immers, deze leveren een externe circulatie van 30 à 50 gew.% zand, met alle ruimtebeslag en onderhoudsproblemen van dien.
5. **Verglazing** wordt nu in Japan algemeen opgelegd door de Overheid. In Europa is deze techniek niet ingeburgerd: er is immers zand genoeg en ook het storten van vlieggas stelt niet echt problemen: in Thüringen, Duitsland wordt de incorporatie in zoutmijnen als recycling bestempeld, tegen een kostprijs van <100€/ton vlieggas, of <2 à 3€/ton huisvuil!