

<b>Betreft</b>	WP3/4	<b>Datum</b>	01/10/2018
<b>Document</b>	Opleidingsmodule Restwarmte	<b>Auteur</b>	Cyx Wouter (Kelvin Sol.) Wouters Niels (Kelvin Sol.)
<b>Versie</b>	V1	<b>Status</b>	werkttekst



## Module

# Restwarmte

*Basisinzichten & tools voor de identificatie  
en kwalificatie van industriële restwarmte*

## Inhoud

1	Inhoud .....	2
2	Inleiding.....	4
3	Over restwarmte .....	5
3.1	Wat is restwarmte? .....	5
3.2	Waarom restwarmte gebruiken? .....	5
3.3	Basisterminologie Restwarmte.....	6
3.3.1	Onderscheid industriële energietoepassingen .....	6
3.3.2	Proceswarmte.....	7
3.3.3	Restwarmte.....	7
3.3.4	Restwarmteterugwinning en terugwinningsgraad .....	8
3.4	Restwarmte en efficiëntie .....	8
3.5	Was het nu BFD, PFD of P&ID? .....	10
3.6	Battery Limits.....	11
4	Restwarmte in Vlaanderen en Europa .....	12
5	Hoe restwarmte waarderen en karakteriseren?.....	15
5.1	Kwantiteit .....	15
5.2	Kwaliteit.....	15
5.2.1	Energetische kwaliteit.....	15
5.3	Medium Kwaliteit .....	18
5.4	Beschikbaarheid .....	20
6	Stappenplan voor identificatie en valorisatie van restwarmte .....	21
6.1	Stap 1 –screening potentiële (rest)warmteproducenten .....	21
6.2	Stap 2 – checken van bedrijfsactiviteiten en warmtenood/ uitstoot .....	22
6.3	Stap 3 – Aansnijden van het eerste contact met een restwarmtebedrijf .....	23
6.4	Stap 4 – opstarten van het haalbaarheidsonderzoek.....	24
7	Restwarmtesectoren.....	26
7.1	Aluminium .....	26
7.1.1	Primaire aluminiumproductie.....	26
7.1.2	Aluminiumsmelters.....	30
7.2	Staalsector .....	31
7.2.1	Geïntegreerde staalfabriek .....	31
7.2.2	Staalfabriek - recuperatiestaal.....	35
7.3	Glas - Productie van glas(vezel) .....	36
7.4	(Petro) Chemische Raffinage – Hoofdactiviteiten .....	38

7.4.1	Basiswerking .....	38
7.4.2	Restwarmtestromen .....	40
7.5	Papier – Papierfabriek .....	41
7.5.1	Productieproces .....	41
7.5.2	Restwarmtebronnen bij papierproductie .....	42
7.6	Voeding - Voeding productie .....	43
7.7	Cement - Droog- en schachtovens.....	43
7.7.1	Cementproductie .....	43
7.7.2	Restwarmte bij cementproductie .....	45
7.8	Coatings - Vinyl Coating fabriek.....	45
8	Restwarmte-uitkoppelingstechnologieën .....	47
8.1	Voordelen van restwarmte valorisatie .....	47
8.2	Afwegingen in het economiseren van een restwarmte-uitkoppeling .....	48
8.3	Overzicht van uitkoppelingstechnieken voor restwarmte .....	49
8.4	Uitkoppelingstechnieken voor warmteterugwinning.....	52
8.4.1	Warmterecuperatoren.....	54
8.4.2	Regeneratieve ovens .....	55
8.4.3	Warmtewiel .....	56
8.4.4	Passieve luchtvoorverwarmers.....	57
8.4.5	Regeneratieve / recuperatieve branders.....	58
8.4.6	Economizers.....	59
8.4.7	Restwarmteboilers (Waste heat Steam boilers) .....	60
8.4.8	Lading voorverwarmen .....	61
8.4.9	Energie recuperatie uit stoomnetwerken.....	61
8.4.10	Warmtepomp .....	65
8.5	Uitkoppelingstechnieken voor elektriciteitsproductie .....	66
8.5.2	Absorptiekoelmachines met restwarmte .....	70
8.6	Enkele praktijkvoorbeelden.....	72
8.6.1	Warmterecuperatie van een lokaal papierfabriek in Skjern, Denemarken .....	72
8.6.2	Energieoptimalisatie in een supermarkt in Høruphav, Denemarken .....	73
8.6.3	Restwarmte van een datacenter in Val d'Europe, Frankrijk .....	74
8.6.4	Industriële restwarmte en transmissie in Leiden, Nederland.....	75

# 1 Inleiding

Deze nota heeft tot doel om basisbeginselen bij te brengen over de techniek achter restwarmtebenutting. Het is niet de per se de bedoeling om de informatie in deze nota op expertniveau aan te brengen. Dit zou dermate ver gaan en in het taakproces van de energiemakelaar toebehoren onder de rol van gespecialiseerde studiebureaus. Het opzet van deze publicatie is niet noodzakelijk dat de lezer het geheel van voren tot achter dient te lezen. Naargelang kennisbehoefte & interesse kunnen specifieke hoofdstukken er uit gelicht worden.

Het is wél belangrijk dat de energiemakelaar over voldoende basisinzicht beschikt om vanuit technische hoek mee te zijn met gesprekken wanneer dit binnen een bedrijfscontext ter sprake komt. Hoewel het project DOEN vooral een praktijkgericht leren beoogt is het onontbeerlijk voor de energiemakelaar om zich deze basiskennis eigen te maken. Het spreken van de juiste taal in de contacten met industrie enerzijds en er voor zorgen dat het projectteam is gevuld met de juiste competente mensen anderzijds ondersteunen deze these alvast.

Deze nota zelf is opgebouwd rond enkele kernvragen die een energiemakelaar zich kan stellen wanneer hij met een restwarmteproject aan de slag moet:

- Wat is restwarmte?
- Hoe kan je restwarmte karakteriseren?
- In welke sectoren vinden we restwarmte?
- Hoe ziet restwarmte er uit?
- Hoe koppelen we restwarmte uit?
- Enz.

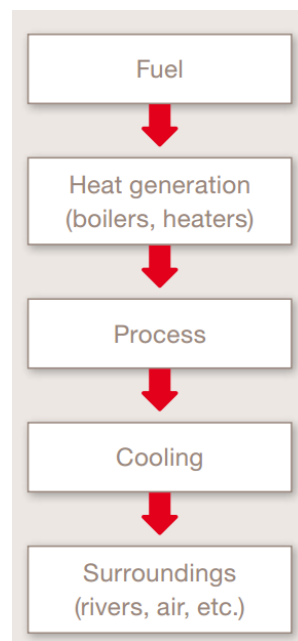
Deze module sluit deels aan op de inleiding rond industriële symbiose. Voor bepaalde methodieken om restwarmte te identificeren en kwalificeren kan een parallel getrokken worden met het ruimer gedefinieerde vakgebied van industriële symbiose.

## 2 Over restwarmte

### 2.1 Wat is restwarmte?

*Restwarmte, in de meest algemene zin, is de energie die samenhangt met de rest(afval)stromen van lucht, rookgassen, vloeistoffen,... en die de grenzen van een proces of faciliteit verlaten en het omgevingsmilieu binnenkomen. Deze reststromen zullen zich uiteindelijk vermengen met de omgevingslucht of grondwater wat maakt dat hun inwendige energie niet meer in geconcentreerde vorm beschikbaar is als nuttige energie.*

**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** schetst kort de verschillende principiële energiestromen binnen een entiteit waarbij er binnen de entiteit geen restwarmtevalorisatie aanwezig is. De opname van restwarmte in het milieu wordt in literatuurstudies vaak als thermische vervuiling beschouwd. In een meer beperktere definitie is restwarmte de energie die voortkomt uit een procesvoering op een voldoende hoge temperatuur wat valorisatie van een deel van deze energie op een economische manier toelaat. (05\_2\_48.pdf: Industrial Waste-Heat Recovery)



FIGUUR 1 - ENERGIESTROMEN BINNEN ENTITEITEN (ZONDER RESTWARMTE-TERUGWINNING)

*Bron: AlfaLaval – Waste heat recovery Optimizing your energy system*

### 2.2 Waarom restwarmte gebruiken?

De betaalbaarheid van energie, klimaatuitdagingen en stabiele energievoorziening vormen een grote uitdaging voor vele organisaties. Goedkope fossiele energie lijkt steeds meer onder druk te komen onder impuls van klimaatacties (de prijs op koolstof). Energie-efficiëntie wordt daarbij een cruciale succesfactor in de bedrijfsvoering.

Veel energie-intensieve productiesites hebben een aanzienlijk onbenut potentieel naar energiebesparing. Een rapport van het “International Energy Agency” stelt dat de industriële sites in de wereld ongeveer 50% of meer energie gebruiken dan noodzakelijk. Door hun energie-efficiëntie te verbeteren, kunnen bedrijven aanzienlijke besparingen bekomen en zo hun milieu-impact verminderen.

Zoals het gezond verstand voorspelt, is de eerste stap naar lagere energiekosten het gebruik van minder energie. Het verhogen van de energie-efficiëntie is meestal de minst dure en de gemakkelijkst te implementeren oplossing voor het merendeel van de procesfabrieken. Het nuttig gebruiken van restwarmte verhoogt integraal de energie-efficiëntie van een bedrijf.

Naast de vermindering van broeikasgasuitstoot kan restwarmtevalorisatie ook een verbetering van de luchtkwaliteit met zich meebrengen. Ieder gebouw of industrieel proces dat met restwarmte voorzien kan worden zorgt er tevens voor dat er geen lokale verbrandingstoestellen met dito luchtverontreiniging opgesteld moeten worden.

Daarnaast genereren restwarmteprojecten economische welvaart voor de bouw en exploitatie van deze systemen. Voor de restwarmteproducent worden er eveneens nieuwe inkomstenstromen gecreëerd.

## 2.3 Basisterminologie restwarmte

Binnen een bedrijf kunnen er verschillende goederen- en energiestromen worden gedefinieerd. (Zie ook “De Value Stream Methode” om zulke processen te modelleren binnen de module rond industriële symbiose). Vaak worden er verschillende terminologieën door elkaar gebruikt, dit merkbaar in de verschillende studies en publicaties die ter voorbereiding van deze nota werden doornomen.

Om verwarring te vermijden worden in deze paragraaf de belangrijkste terminologieën m.b.t. restwarmte; toegelicht. Deze begrippen zullen worden in dit werkstuk veelvuldig gebruikt.

### 2.3.1 Onderscheid industriële energietoepassingen

Energie die wordt gebruikt binnen een industrieel bedrijf, kan aan een aantal toepassingen toebedeeld:

- *On site-opwekking voor utilities*, zoals stoom, water en perslucht, enz. die wordt gedistribueerd en gebruikt in de fabriek.
- *Procesenergiegebruik* dat wordt gedistribueerd over verschillende systemen binnen een installatie, zoals procesverwarming, proceskoeling en koeling, elektrochemische, machinebesturing en ander gebruik.
- *Niet-procesmatig energiegebruik*, zoals verwarming van gebouwen, ventilatie en airconditioning; verlichting; ondersteunende diensten; en vervoer op locatie.

De onderstaande figuur geeft een principiële schets van functionele eenheden met typische energiestromen die binnenin een bedrijf kunnen worden gevonden.

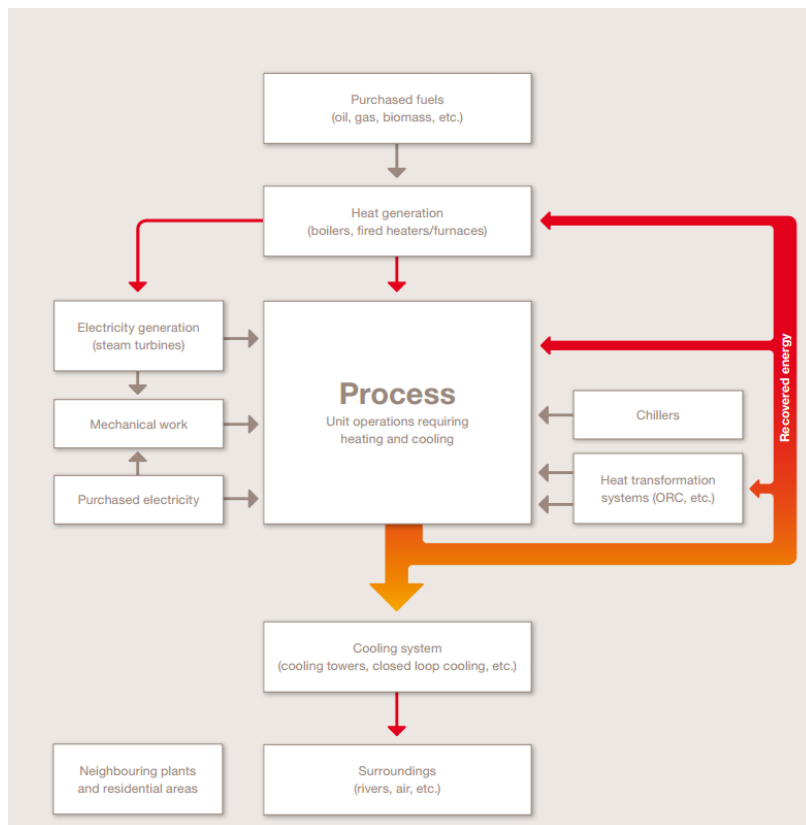
De industriële vraag naar energie, (=energiebehoefte) wordt hoofdzakelijk gestuurd vanuit het proces. Een bedrijf heeft namelijk energie input nodig om zijn bedrijfsvoering/procesvoering uit te kunnen voeren waarbij een energiebehoefte zowel elektrisch als thermisch kan zijn. (Soms worden klassieke energiedragers ook als grondstof voor een procesverbruik waardoor bijvoorbeeld niet elke gasverbruik gelijk staat aan de energiebehoefte) In een ruimer kader kan mechanische werk ook als input worden beschouwd voor het proces.

Een bedrijf kan, voor het voldoen van zijn energiebehoefte, brandstoffen aanwenden om via warmtegeneratoren warmte te produceren onder diverse vormen & kwaliteiten. Warmte kan integraal aan het proces worden geleverd of worden aangewend via stoom of rechtstreekse verbranding om elektriciteit te produceren. Elektriciteit kan ook worden voorzien via een directe aankoop vanuit het algemene elektriciteitsnet.

De energie die aan het proces werd geleverd zal meestal uiteindelijk terug beschikbaar komen, eventueel in een andere (laagwaardigere) vorm, meestal onder de vorm van restwarmte. Hierbij zal een gedeelte van de

restwarmte via een koelsysteem naar zijn omgeving worden afgevoerd. Een ander gedeelte van de restwarmte kan via een warmterecuperatiesysteem terug aan het proces worden geleverd als nuttige energie of aan de warmtegenerator.

Het energie- en kostenbesparingspotentieel is in de meeste gevallen nauw verbonden met de warmtestroom in de installatie. Het basisidee achter restwarmteterugwinning is proberen maximale hoeveelheden warmte in de installatie terug te winnen en zoveel mogelijk opnieuw te gebruiken, in plaats van het in de lucht of in een nabijgelegen rivier af te geven. In eerste plaats moet gekeken worden naar interne restwarmtevalorisatie. Wanneer dit niet mogelijk blijkt dient gekeken te worden naar afzetmogelijkheden buiten de bedrijfssite.



FIGUUR 2 - PRINCIPESHEMA ENERGIESTROMEN BINNEN BEDRIJVEN

### 2.3.2 Proceswarmte

De proceswarmte is de totale benodigde warmte energievraag vanuit het proces zodat een bedrijf zijn procesvoering kan uitvoeren. Binnen één proces kunnen diverse warmtestromen actief zijn of gebruikt worden met elk zijn eigen specifieke kenmerken naar bv. fysische toestand, druk, temperatuur,... De temperatuur waarop het proces wordt uitgevoerd noemt de procestemperatuur. Kennis over de proceswarmte is essentieel om nadien de voortvloeiende warmte te kunnen inventariseren en waarderen.

### 2.3.3 Restwarmte

Restwarmte, in de meest algemene zin, is de energie die samenhangt met de rest(afval)stromen van lucht, rookgassen, vloeistoffen,... die de grenzen van een faciliteit verlaten en het milieu binnenkomen. Deze reststromen zullen zich uiteindelijk vermengen met de omgevingslucht of grondwater wat maakt dat hun inwendige energie niet beschikbaar wordt als nuttige energie.

In bovenstaande **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** wordt de totale vrijkomende proceswarmte als restwarmte afgevoerd. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** wordt een deel van de geproduceerde restwarmte, die in eerste instantie naar de omgeving werd afgevoerd, opnieuw teruggewonnen en aan het proces geleverd. Dit kan maar indien er een aantal technische en economische voorwaarden wordt voldaan.

De restwarmte die uiteindelijk in zijn omgeving terecht komt, kan als verloren worden beschouwd. De voor het bedrijf als restwarmte beschouwde warmte kan voor andere, naburige bedrijven of residentiële gebouwen ook nog van waarde zijn. Zo kan door de som van samenwerkende partners een globale hogere efficiëntie worden bekomen.

### 2.3.4 Restwarmteterugwinning en terugwinningsgraad

Restwarmteterugwinning is de energie die vanuit de totale hoeveelheid restwarmte wordt gevaloriseerd en opnieuw aan een proces of een externe gebruiker wordt geleverd. Hierbij kan de energie die wordt gerecupereerd zowel thermisch als elektrisch (door omzetting via een ORC) zijn. Voor de productie van elektriciteit via een ORC is er vooral nood aan een restwarmtebron op een voldoende hoge temperatuur (vanaf 80°C of hoger). Om warmte uit de restwarmte te winnen zal er meestal beroep worden gedaan op een uitkoppelingstechnologie.

*De Restwarmteterugwinningsgraad = Gevaloriseerde restwarmte / Totale hoeveelheid restwarmte [%]*

De restwarmte kan omwille van allerlei factoren, zoals een te hoge temperatuur, vervuiling,... niet altijd rechtstreeks worden aangewend.

## 2.4 Restwarmte en efficiëntie

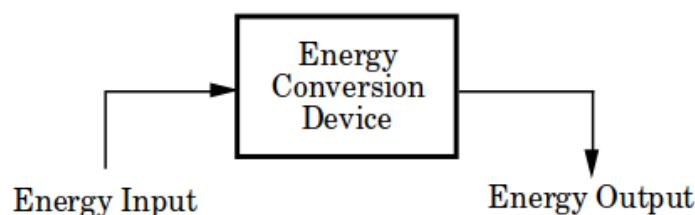
De valorisatie van restwarmte en reststromen gaat in essentie over het verhogen van de (energie)efficiëntie. Het begrip efficiëntie kan in zijn meest algemene vorm worden herleid naar:

$$Efficiëntie = \frac{Nuttige\ energieoutput}{Nuttige\ energieinput} = \frac{Nuttige\ energieoutput}{Nuttige\ energieoutput + energieverlies}$$

$$Efficiëntie = \frac{Nuttige\ energieoutput}{Nuttige\ energieoutput + energieverlies - nuttige\ energierecuperatie}$$

Efficiëntie kan gedefinieerd worden op verschillende niveaus. Dit kan duiden op de efficiëntie van een toestel, installatie, proces of een totaal bedrijf, bedrijventerrein of gebied.

De betekenis van het woord 'nuttig' is afhankelijk van het doel van het apparaat. Als het apparaat bijvoorbeeld een elektrische verwarmers is, is de nuttige energie output warmte en is de nuttige energie input elektriciteit (elektriciteit wordt omgezet in warmte).



Warmte wordt ook verkregen door bijvoorbeeld de omzetting van elektrische stroom in een gloeilamp. Maar dit is niet de nuttige energie verkregen uit een gloeilamp, het doel van een gloeilamp is om elektriciteit in licht



om te zetten. De warmtegeneratie die gepaard gaat met de productie van licht, in een gloeilamp, is het energieverlies.

In onderstaande **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** zijn een aantal conversie toestellen met hun energie input en output weergegeven.

Energy Conversion Device	Energy Input	Useful Energy Output
Electric heater	Electricity	Thermal energy
Hair drier	Electricity	Thermal energy
Electric generator	Mechanical energy	Electricity
Electric motor	Electricity	Mechanical energy
Battery	Chemical energy	Electricity
Steam boiler	Chemical energy	Thermal energy
Furnace	Chemical energy	Thermal energy
Steam turbine	Thermal energy	Mechanical energy
Gas turbine	Chemical energy	Mechanical energy
Automobile engine	Chemical energy	Mechanical energy
Fluorescent lamp	Electricity	Light
Silicon solar cell	Solar energy	Electricity
Steam locomotive	Chemical	Mechanical
Incandescent lamp	Electricity	Light

FIGUUR 3 - TYPISCHE ENERGIE CONVERSIE TOESTELLEN (BRON: CHAPTER 4 -EFFICIENCY OF ENERGY CONVERSION)

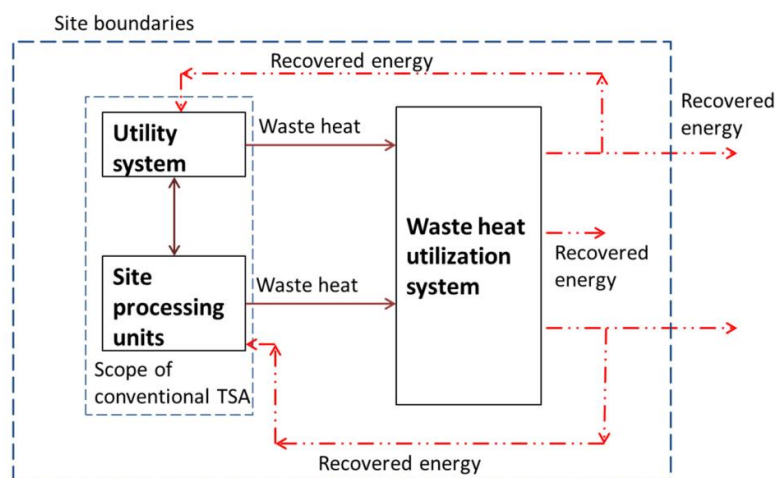
Bij vele van deze types conversieapparaten is er een potentieel om de energie efficiëntie te verhogen en de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen door terugwinning en gebruik van restwarmte.

Om tot een globale verbetering te bekomen van de energie-efficiëntie dienen een aantal belangrijke stappen gezet te worden bij het inzetten van die restwarmtebronnen.

In eerste instantie dient er binnen het industrieelproces gekeken te worden naar manieren om de efficiëntie te verhogen door:

- De procesbehoefte aan energie in de mate van het mogelijke terug te dringen,
- De vrijkomende restwarmte vanuit het eigen proces zoveel als mogelijk binnen het eigen proces opnieuw in te zetten (bijvoorbeeld als voorverwarming van producten).

Slechts als de restwarmte niet meer zinvol valoriseerbaar is binnen het eigen proces, geniet restwarmtevalorisatie binnen de bedrijfseigen business units, -processen of –nutsvoorzieningen de voorkeur. Via zogenaamde uitkoppelingstechnologieën kan de restwarmte gerecupereerd worden, waarna dit opnieuw als gerecupereerde input kan dienen voor het proces, ...

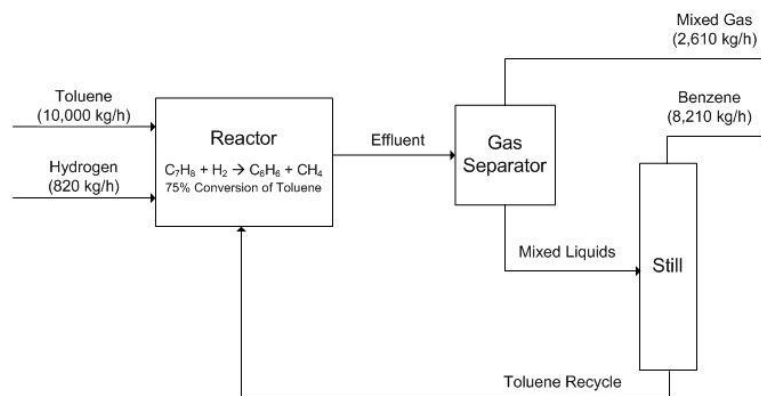


FIGUUR 4 - VALORISATIEPRINCIPES BEDRIJF (BRON: (INTEGRATION OF WASTE HEAT RECOVERY IN PROCESS SITES, 2015)

## 2.5 Was het nu BFD, PFD of P&ID?

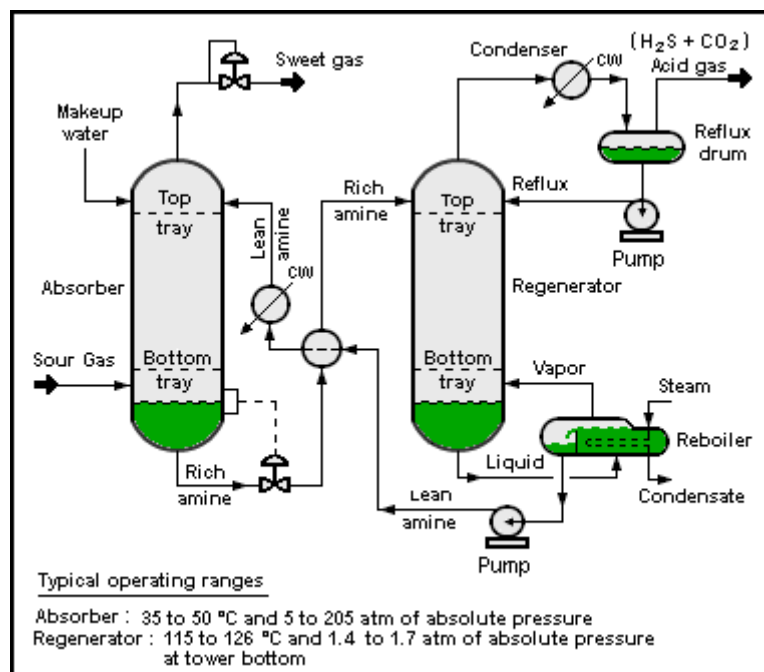
Bij het ontwerp van een (chemische) fabriek wordt vaak begonnen met het opzetten van een BFD of PFD. Hierin is te zien welke stappen de hoofdstroom en hoofdproducten doorlopen en welke apparaten/ processen er in de fabriek aanwezig zijn.

*BFD* staat voor *Block Flow Diagram* en is een sterk vereenvoudigde schematische voorstelling van een industrieel proces.



FIGUUR 5 - VOORBEELD BFD (BRON: WIKIMEDIA COMMONS)

*PFD* is een afkorting voor het Engelse *Process Flow Diagram*. Een PFD is een meer uitgewerkte variant van een BFD meer nog steeds schematische en eenvoudige weergave van een proces waarin te zien is welke processtappen worden doorlopen. Op een PFD worden de belangrijkste ontwerpgegevens zoals capaciteiten en debieten in weergegeven. Het PFD dient als basis om de specificaties voor alle onderdelen op te stellen.

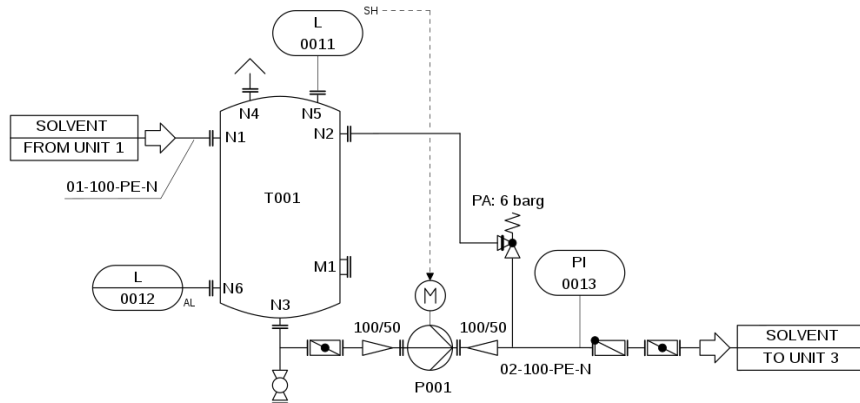


FIGUUR 6 - VOORBEELD PFD (BRON: WIKIMEDIA COMMONS)

Daarna wordt het gedetailleerde *Process and Instrumentation Diagram (P&ID)* opgesteld. Een P&ID is een technische tekening die schematisch laat zien hoe leidingen en andere onderdelen van een procesinstallatie

met elkaar verbonden zijn. Er worden ook regelkringen schematisch weergegeven in de P&ID. Leidingen worden in een P&ID diagram weergegeven met een doorgetrokken lijn, regelkringen met een gestippelde lijn. In de gestippelde lijn is dan ook een verbinding weergegeven met de verschillende instrumenten die gegevens leveren aan de regeling.

	T001	P001
SERVICE	STORAGE TANK	FEED PUMP
DATA	DIAMETER: 1000 mm HEIGHT: 3000 mm CAPACITY: 2.4 m <sup>3</sup>	FLOW RATE: 5 m <sup>3</sup> /h DIFF. PRESSURE: 2.5 barg
DESIGN PRESSURE	10 barg	10 barg
DESIGN TEMP.	50 °C	50 °C



FIGUUR 7 - VOORBEELD P&ID (BRON: WIKIMEDIA COMMONS)

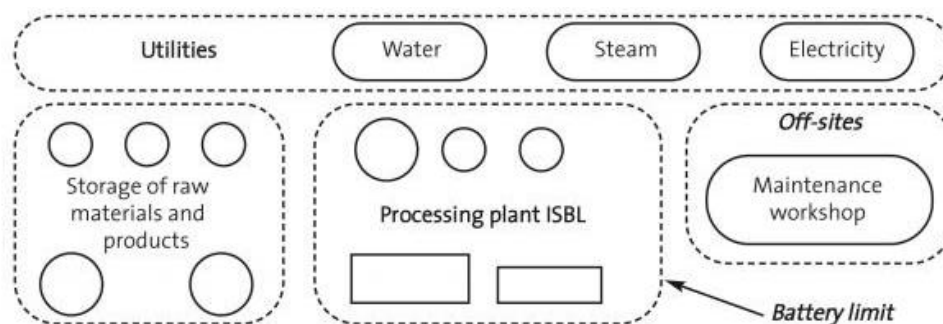
De P&ID schema's vormen de basis voor wat uiteindelijk de engineeringplannen zullen worden voor de bouw van een installatie. P&ID schema's worden doorgaans gebruikt om SCADA<sup>1</sup>-visualisaties rond op te bouwen.

## 2.6 Battery Limits

Bij het uitwerken van PFD- diagrammen en contractuele regelingen voor het opzetten van energieprojecten wordt regelmatig het begrip "Battery Limits" gehanteerd.

Een battery limit is een gedefinieerde grens tussen twee systemen, die fysiek kunnen zijn verbonden. Een voorbeeld hiervan is de plaatsing van een stoomturbine voor elektriciteitsproductie van een onafhankelijke energieproducent op het bedrijfsstoomnetwerk van een petrochemisch bedrijf.

Een battery limit beschrijft de grenzen van aanneming in kader van een project en legt daarmee vaak ook de juridische exploitatie- en eigendomsgrenzen vast. Het punt daarentegen waarop twee systemen met elkaar connecteren noemt men typisch het "point of delivery", overdrachtspunt of injectiepunt.



FIGUUR 8 - VOORBEELD DEFINITIE "BATTERY LIMITS"

<sup>1</sup> Supervisory Control & Data Acquisition

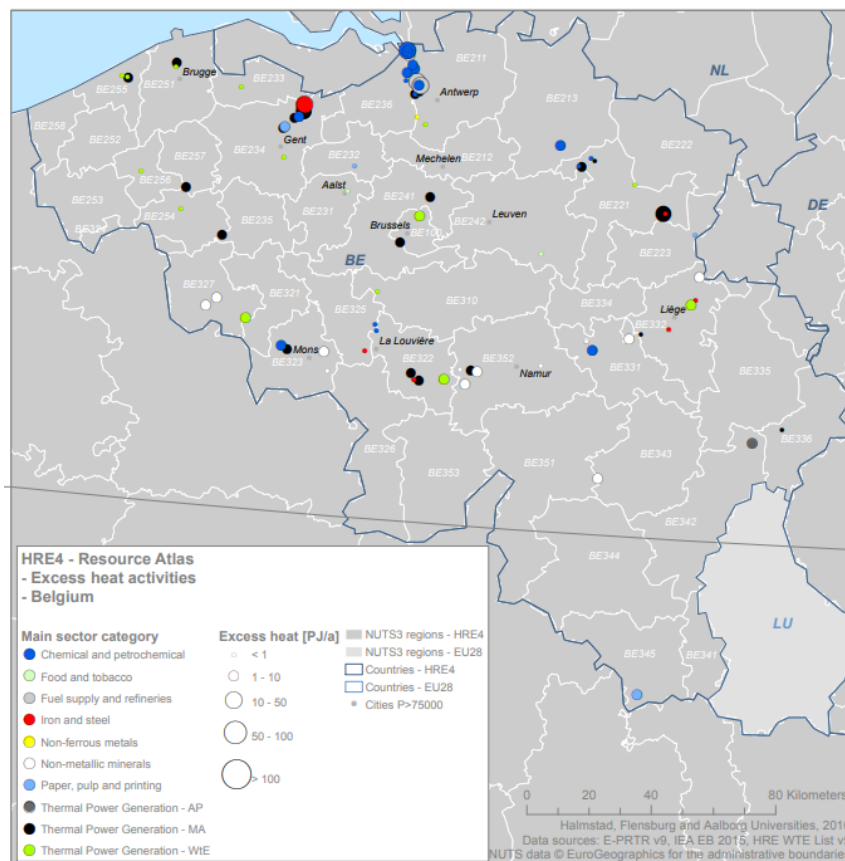
### 3 Restwarmte in Vlaanderen en Europa

Rond het thema “restwarmte” zijn er in het verleden al een aantal werken gepubliceerd. Er zijn met name twee bekende publicaties die voor Vlaanderen en Europa geraadpleegd kunnen worden:

- Het rapport “Warmte in Vlaanderen” – door VITO opgemaakt in opdracht van de Vlaamse overheid ([KLIK HIER](#));
- De Pan European Thermal Atlas (PETA) – opgemaakt door een Europees academisch onderzoek consortium – met steun van de Europese Unie ([KLIK HIER](#))

De eerste publicatie behandelt het restwarmtepotentieel in Vlaanderen terwijl de tweede het warmtepotentieel van België op Europees niveau aftoetsen. Afhankelijk van de publicatie worden diverse methodieken gehanteerd om het restwarmte potentieel van een gebied in kaart te brengen. Inherent aan elke methodiek is dat dit gepaard gaat met een bepaalde onnauwkeurigheid / onvolledigheid.

*De Europese PETA geeft aan dat de 87 grootste productiefaciliteiten in België maximaal zo’n 68 TWh aan restwarmte zouden produceren. Goed voor ongeveer 73% van de finale energievraag voor ruimteverwarming en warm tapwater in België. In totaliteit wordt door de PETA zo’n 86,9 TWh aan restwarmtepotentieel ingeschaald.*



FIGUUR 9 – RESTWARMTEATLAS BELGIË HEAT ROADMAP EUROPE (BRON: [HTTP://WWW.HEATROADMAP.EU/OUTPUT.PHP](http://www.heatroadmap.eu/output.php))

De meest geciteerde of gekende restwarmte-inventaris uit de afgelopen jaren in Vlaamse context is die door VITO werd opgemaakt in kader van de Vlaamse warmtekaart. Zoals VITO zelf aanhaalt is deze inventaris eerder opgemaakt bij wijze van orde-grootte-bepaling gezien de onnauwkeurigheden om tot een “High-Level”

inschatting te komen. Als een eerste benadering is deze High-Level benadering interessant daar de benadering de restwarmtepotentie sectoraal weergeeft maar voor verder gebruik is de bruikbaarheid eerder beperkt.

In onderstaande tabel wordt via de PDC-methode het restwarmtepotentieel ingeschat waarbij de lage temperatuur restwarmtebronnen < 60°C niet werden opgenomen.

	Warmtevraag (GWh)	Aanbod Restwarmte <120°C (GWh)	Aanbod Restwarmte 120-200°C (GWh)
Raffinaderijen	17.300	900	900
IJzer & staal	4.300	0	4.300 (*)
Non-ferro	1.500	200	800
Chemie	33.600	4.900	4.900
Mineraal	2.100	600	1.400 (*)
Voeding	5.600	500	0
Textiel	600	0	0
Papier, druk	3.000	0	0
Technologie	900	0	0
Kunststof, hout	1.200	200	0
<b>TOTAAL</b>	<b>70.100</b>	<b>7.400</b>	<b>12.300</b>

*(\*) Overschatting van het potentieel wegens onvoldoende in rekening brengen van de mogelijkheden tot interne warmterecuperatie door de PDC-methode, zie eerdere opmerking bij de beschrijving van de methode*

FIGUUR 10 - AANBOD RESTWARMTE PER INDUSTRIËLE SUBSECTOR IN VLAANDEREN (< 120°C EN 120-200°C) VOOR HET BASISJAAR 2012

De weergegeven restwarmtepotentiëlen zijn theoretische potentiëlen die als een bovengrens kunnen worden beschouwd. De theoretische beschouwingen en het praktisch potentieel kunnen en zullen waarschijnlijk dus sterk verschillen. Het is dan ook nodig om het theoretisch restwarmtepotentieel van een bepaalde plant/ site verder te specificeren naar realistische potentiëlen. Het gevaar gaat er in schuil dat beleidsmakers het theoretische potentieel als te vanzelfsprekend of met gebrek aan nuance gaan bekijken met een grote overschatting van het werkelijke potentieel tot gevolg.

Wanneer het VITO-potentieel (70TWh) plaatsen naast het PETA-potentieel (86,9 TWh voor België), dan valt op dat het eerste potentieel flink hoger is ingeschaald in verhouding tot de regio-grootte. De methode van inschatting is hier niet vreemd aan.

Binnen de PETA worden volgende vrijkomende restwarmterecuperatie-inschattingen gebruikt:

**Table 1. Main activity sector category labels and corresponding default recovery efficiencies ( $\eta_{heat}$ ). Default values set to reflect the maximal excess heat recovery potential from considered main activity sectors at current conditions**

Main activity sector category	Abbreviation	$\eta_{heat}$
Thermal Power – Main Activity	TP-MA	50%
Thermal Power – Auto-producer	TP-AP	60%
Thermal Power – Waste-to-Energy	TP-WTE	60%
Fuel supply and refineries <sup>a</sup>	FSR	50%
Chemical and petrochemical <sup>b</sup>	CPC	25%
Iron and steel <sup>c</sup>	IS	25%
Non-ferrous metals	N-FM	25%
Non-metallic minerals <sup>d</sup>	N-MM	25%
Paper, pulp and printing	PPP	25%
Food and beverage <sup>e</sup>	FB	10%

<sup>a</sup> Not including NACE main economic activities: Extraction of crude petroleum, Extraction of natural gas.

<sup>b</sup> Not including NACE main economic activities: Extraction of salt, Growing of citrus fruits.

<sup>c</sup> Not including NACE main economic activities: Mining of iron ores, Other mining and quarrying n.e.c.

<sup>d</sup> Not including Annex I activities: Opencast mining and quarrying, Underground mining and related operations, and NACE main economic activity; Quarrying of ornamental and building stone, limestone, gypsum, chalk and slate.

<sup>e</sup> Including NACE main economic activities: Manufacture of oil and fats, Manufacture of starches and starch products, Manufacture of sugar, and Manufacture of other organic basic chemicals.

Binnen de Vlaamse warmtekaart werd de restwarmte op een temperatuur < 120 °C van niet puntbronnen buiten beschouwing gelaten. Ingeschatte restwarmte >120°C zal niet noodzakelijk beschikbaar zijn voor externe warmtelevering, maar kan het ook intern binnen een entiteit gerecupereerd worden, als daarvoor geschikte toepassingen bestaan. Het restwarmtepotentieel op een temperatuur < 120°C wordt als theoretisch restproduct beschouwd van een hogere temperatuurbron volgens de PDC-methode.

Door de keuze om enkel restwarmte op een temperatuur > 120°C te behandelen, komen enkel de grootschalige en gecentraliseerde restwarmte bronnen tot hun recht. De gedecentraliseerde bronnen die op diverse locaties vertegenwoordigen een belangrijke waarde en dienen volledigheidshalve ook in beschouwing te worden genomen. De PDC-methode kent aan een aantal sectoren zoals bijvoorbeeld voeding en textiel geen restwarmte-aanbod toe, in tegenstelling tot praktijkvoorbeelden in andere Europese landen. De zeer laagwaardige restwarmte (< 60°C) wordt niet benoemd en volledig buiten beschouwing gelaten. Naar vermoeden is de hoeveelheid zeer laagwaardige restwarmte van eenzelfde orde grootte dan wel nog groter dan de laagwaardige restwarmte. Voor de zeer laagwaardige restwarmte is geen inschatting voor handen maar naar vermoeden is de hoeveelheid laagwaardige restwarmte van eenzelfde orde grootte dan wel nog groter dan de laagwaardige restwarmte.

Samengevat kunnen de restwarmte-inventarissen gebruikt worden om een algemeen en theoretische maximumbeeld te krijgen van het restwarmte potentieel in Vlaanderen. Voor concrete locaties in kader van energiemakelaarschap is het echter van belang dat een meer gedetailleerde haalbaarheidsstudie wordt uitgevoerd in welke hoeveelheid en voor welke toepassing de restwarmte haalbaar is.

(Bron: [Eindrapport Warmte in Vlaanderen – VITO, 2015](#)).

## 4 Hoe restwarmte waarderen en karakteriseren?

Om het potentieel van beschikbare restwarmte te kunnen inschatten, moet een beschikbare restwarmte(afval)stroom worden beoordeeld op minimaal volgende 3 belangrijke parameters:

- De kwantiteit van restwarmte;
- De kwaliteit van restwarmte;
- De beschikbaarheid van restwarmte in de tijd.

(Bron: C. Arzbaecher, [Industrial Waste Heat Recovery](#), 2007)

Het ene facet kan niet los worden gezien van het andere gezien hun quasi evenwaardige belang. Als energiemakelaar is het daarom niet verkeerd om met enige terughoudendheid te kijken naar de kansrijkheid van een restwarmtebron wanneer niet alle drie de aspecten degelijk werden beoordeeld.

### 4.1 Kwantiteit

De kwantiteit van de beschikbare restwarmte wordt in veel gevallen uitgedrukt als een Enthalpie waardering van de restwarmtestroom.

$$H = m * h$$

Hierin is:

- H: Totale enthalpie waardering van de restwarmtestroom [kW ]
- m: Massadebiet van de restwarmtestroom [kg/s]
- h: Specifieke enthalpie van de restwarmtestroom [kJ/kg]

Om op het niveau van energiebalansen te kunnen rekenen dient het restwarmtevermogen te worden vertaald naar een beschikbare kwantiteit op jaarbasis (in [GJ] of [MWh] bijvoorbeeld) om zo een eerste vergelijking met de beoogde warmtevragers te kunnen maken.

De hoeveelheid beschikbare moet in enige mate in verhouding staan tot de warmtevraag, net als de kosten die gemaakt moeten worden om deze restwarmte uit te koppelen en de warmtevragers er mee te ontsluiten. Doorgaans speelt het schaal-effect sterk bij restwarmtebronnen. Binnen de industriële context zijn er vaak tientallen zo niet honderden restwarmtebronnen terug te vinden op een industriële site van enige omvang. Eén van de deal breakers hierbij is vaak dat de brongrootte te klein (enkele tientallen of honderden kilowatt vermogen) is of de vaste kosten te hoog om te kunnen rekenen met een restwarmte-uitkoppeling.

### 4.2 Kwaliteit

#### 4.2.1 Energetische kwaliteit

De kwaliteit van een restwarmtestroom kan enerzijds beoordeeld worden in termen van de temperatuur van de reststroom. Hoe hoger de temperatuur, hoe kwalitatiever de restwarmtestroom is. De temperatuur van een restwarmtestroom kan best hoger of zo dicht mogelijk tegen de gevraagde temperatuur liggen. Het gebruik van een warmtepomp kan de temperatuurkwaliteit van restwarmte verhogen maar gaat ten koste van de economische efficiëntie o.w.v. de bijkomende apparatuur. Anderzijds kan een restwarmtestroom ook gebruikt worden bij wijze van voorverwarming zoals verderop deze bundel ook wordt aangetoond.

De thermische kwaliteit van restwarmte kan geheel artificieel ingedeeld worden in verschillende temperatuurcategorieën om de kwaliteit ervan te kunnen onderscheiden:

Temperatuurclassificatie:			
Laag	Hoog	Omschrijving	Cat
		geen noemenswaardige warmtevraag ingeschaald	0
0	30	Buildings - Low Temperature	1
30	80	Buildings - Medium Temperature	2
80	121	Industry - Ultra low temperature	3
121	232	Industry - Low temperature	4
232	649	Industry - Medium temperature	5
649	871	Industry - High temperature	6
871	-	Industry - Ultra High temperature	6

FIGUUR 11 - VOORBEELD TEMPERATUURCLASSIFICATIE VOOR RESTWARMTEBRONNEN

Om de thermische kwaliteit te kunnen inschatten werd in onderstaande tabellen een catalogus opgemaakt met typische procestemperaturen die binnen industriële warmtevraagprocessen kunnen worden teruggevonden:



Industry	Most Important Processes	Temperature [°C]		NACE-code (Main Industry)
		Lower level	Upper Level	
<b>Food, Beverage en Tabacco</b>				10.1 – 10.9 & 11.0 & 12
	Washing	30	90	
	Boiling	93	110	
	Pasteurising	70	120	
	Sterilising	130	150	
	Thickening	60	70	
	Baking/Frying	80	220	
	Heat-treatment	30	60	
	Drying (food processing, breweries, dairy)	29	224	
	Yogurt maturation (dairy)	41	46	
	Solvent extraction and distillation of vegetable oil (food processing)	60	110	
	Distilling (breweries)	96	102	
	Evaporating (dairy)	60	149	
	Steam boiler exhaust (without energy recovery)	232	482	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
	Air Compressor cooling	38	82	
<b>Plastics Industry</b>				22.2
	Dehumidification/heating of air for plastic injection molding	32	88	
	Air Compressor cooling	38	82	
<b>Cement</b>				23.5
	Exhaust gas from cement kilns (dry process) (without energy recovery)	621	732	
<b>Iron, steel &amp; non-ferro production</b>				24.1-24.5
	Exhaust gas from open hearth furnaces (without energy recovery)	649	704	
	Exhaust gas from metal furnaces	650	1100	
	Exhaust gas from heat treating furnaces (without energy recovery)	427	649	
<b>Waste-to-Energy</b>				38.2
	Exhaust gas from solid waste incinerators (without energy recovery)	649	982	
<b>Glass &amp; ceramics</b>				23.1-> 23.4
	Exhaust gas from ceramics baking furnaces (without energy recovery)	750	1100	
	Exhaust gas from glass melting furnaces (without energy recovery)	982	1538	
<b>Metaalverwerkende nijverheid &amp; technologie</b>				25.1->33.2
	Surface treatment	21	110	
	Exhaust gas from heat treating furnaces (without energy recovery)	427	649	
	Lubricating/washing	38	149	
	Degreasing	49	66	
	Heating plating, pickling, scouring baths	49	93	
	Drying	79	91	
	Steam boiler exhaust (without energy recovery)	232	482	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
	Exhaust gas from drying and baking ovens (without energy recovery)	232	593	

FIGUUR 12 - CATALOGUS PROCESTEMPERATUREN (DEEL 1)

Industry	Most Important Processes	Temperature [°c]		NACE-code (Main Industry)
		Lower level	Upper Level	
<b>(Petro)Chemical &amp; cokes</b>				<b>19.1-19.2 &amp; 20.1-20.6 &amp; 22.1</b>
	Var. Processes	120	250	
	Distilling	120	350	
	Pressing	110	170	
	Boiling	93	110	
	Thickening	130	140	
	Exhaust gas from catalytic crackers (without energy recovery)	427	649	
	Exhaust gas from hydrogen plants (without energy recovery)	649	982	
	Exhaust gas from fume incinerators (Thermal oxidisers - without energy recovery)	649	1427	
	Steam boiler exhaust (without energy recovery)	232	482	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
<b>Paper industry</b>				<b>17.1-17.2</b>
	Bleaching	40	140	
	Deinking	50	70	
	Boiling	100	160	
	Drying	90	200	
	Steam boiler exhaust (without energy recovery)	232	482	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
	Air Compressor cooling	38	82	
<b>Textile industry</b>				<b>13.1----&gt; 15.2</b>
	Washing	30	80	
	Dyeing	70	160	
	Rinsing after dyeing	46	52	
	Bleaching	60	100	
	Drying	93	149	
	Steam boiler exhaust (without energy recovery)	232	482	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
	Air Compressor cooling	38	82	
<b>Wood</b>				<b>16.1-16.2</b>
	Drying (lumber)	40	99	
	Pickling	40	70	
	Heating, drying, corrugation (pulp and paper)	110	170	
	Reciprocating engine exhaust or Gas turbine exhaust (without energy recovery)	232	593	
	Air Compressor cooling	38	82	

FIGUUR 13 - CATALOGUS PROCESTEMPERATUREN (DEEL 2)

### 4.3 Medium Kwaliteit

Naast de thermische kwaliteit is ook de kwaliteit van het medium waaronder de restwarmte vrijkomt van belang. Het medium bepaalt mee welke technologieën gebruikt kunnen worden om de restwarmte uit te koppelen. Dit gaat samen met de eventuele vervuilingsgraad van het medium. De contaminatie van restwarmtestromen mag niet onderschat worden om de haalbaarheid van een restwarmtekoppeling in te schatten. Ook de condensatie- en zuurvorming bij afgassen en rookgassen kan een potentiële drempel vormen. Deze effecten nopen tot het gebruik van speciale materialen (bijvoorbeeld grafiet), er van uitgaande dat de procesinstallatie bestand is tegen deze zuurvorming wat zeker niet altijd het geval is. Onderstaande Tabel geeft weer onder welke vormen restwarmte vrij kan komen, welke opportuniteiten en drempels/ beperkingen hiermee gepaard kunnen gaan:

Waste Heat Source	Heat Recovery Opportunities	Potential Barriers or Limitations – Currently Available Equipment
Clean exhaust gases from boilers, crackers, fired heaters, combustion turbines, and other sources	Low-temperature (<500°F or 260°C) heat recovery from combustion products with moisture content of 15%–20%.	No major technical barriers. Economics of heat recovery system installation and use of recovered heat within the plant are two major barriers. Electricity generation using heat from these sources using low-temperature systems (i.e., ORC) is uneconomical at current state of technology.
Exhaust gases from thermal oxidizers	Heat recovery from high- temperature gases – sensible and latent heat.	The gases are at high temperature and are highly corrosive, containing chlorinated gases and other gases. At this time they need to be quenched, hence loss of useful energy.
Hydrogen from chlorine process	Heat content of hydrogen.	The gas contains chlorine and it can turn into hydrochloric acid (if it reacts with H <sub>2</sub> and dissolves in aqueous condensate), which will be corrosive to the heating systems. Proper treatment is required.
Heat from various exothermic processes	Recovery of heat of reaction to produce steam at high pressure with end goal of using steam in processes or for electric power generation.	Simple method of integrating steam generation within the process reactors.
Heat from hot products from reactors	Sensible heat recovered from hot products.	No simple method of recovering the heat (heat recovery equipment for solid or liquid to air or gas) that can fit into existing footprint of the plant.
Exhaust gases from multiple stacks	Use of sensible heat and latent heat of liquid – water vapor. Reduction in water use at the plants.	Logistics of collecting stack gases and using them in conventional heat exchanger poses available space in existing footprint. Microchannel heat exchanger with small size has no history of use in the chemical industry and may pose maintenance problems.
Heat from gases containing water vapors discharged from evaporators and other units.	Use of sensible heat and latent heat of liquid – water vapor. Reduction in water use at the plants.	Quality of water vapor, which may contain gaseous and solid contaminants. Currently available heat exchangers (condensers) are too big. Need smaller size heat exchangers to fit into the existing footprint of the plant. Vapor filtration or water purification system availability.
Low-pressure steam	Latent heat of steam and water.	Dry coolers to eliminate use of water, which is scarce in many areas of the plant location.
Low-temperature cooling water	Sensible heat of water.	Availability of water at low temperatures. Lack of availability of indirect dry (air) coolers that can replace cooling towers or conventional water to water heat exchangers.
Flared gases with high hydrocarbon content.	Heating value of gases or feedstock recovery.	Periodic and unpredictable nature of the source of gases.
Byproduct solids or residues	Sensible heat and heat content of the material.	Material handling and combustion systems for contaminated solids.

**FIGUR 14 - WASTE MATRIX OF WASTE HEAT SOURCES, RECOVERY OPPORTUNITIES AND BARRIERS FOR THE CHEMICAL AND PETROLEUM REFINING INDUSTRIES**

## 4.4 Beschikbaarheid

De beschikbaarheid van restwarmte is een tijdmaatstaf om te duiden of de restwarmte beschikbaar is op momenten dat dit nodig is. De afstemming van de beschikbaarheid van de restwarmte op de uiteindelijke belasting (=vraag) is een belangrijke overweging in de effectiviteit van restwarmterugwinning.

In de toepasbaarheid van een restwarmtebron is de beschikbaarheid de een even belangrijk factor, zo niet belangrijker dan de kwantiteit of de kwaliteit van de restwarmte.

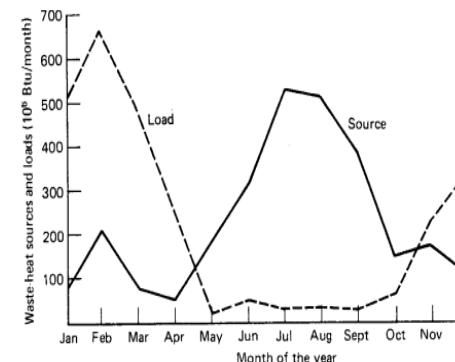
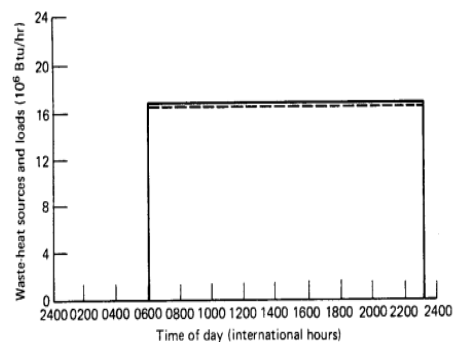
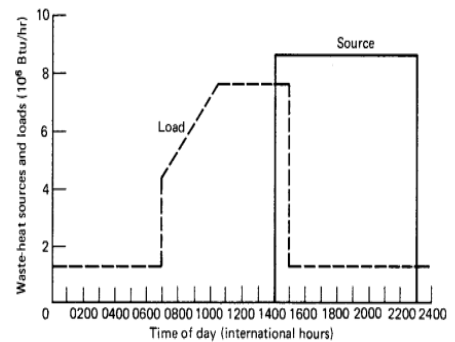
Enkele voorbeelden van synchrone en niet-synchrone verbanden tussen restwarmtebronnen en restwarmtebelastingen worden geïllustreerd in de figuur. Deze toont een kwantiteit en een tijdsbeschikbaarheid van een bronprofiel en verbruiksprofiel.

In de bovenste deelfiguur wordt het restwarmteprofiel getoond van een batchproces in 2 shifts. Zoals te zien is aan de stippelijijn, is de belasting beschikbaar alleen beschikbaar tijdens de eerste shift. De respectieve hoeveelheden en kwaliteiten lijken op bevredigende wijze te passen, maar de beschikbaarheid van tijd van de bron kan niet erger zijn.

Als de waardevolle restwarmtebron moet worden gebruikt, is het nodig om (1) een van beide te herplannen om ze in de tijdcorrespondentie te brengen, (2) het warme water opwekken tijdens de tweede shift en bewaar het totdat het nodig is aan het begin van de eerste shift de volgende dag, of (3) een andere warmtebelasting te vinden met een over het algemeen betere pasvorm dan de weergegeven belasting.

In de middelste deelfiguur zien we een bijna perfecte pasvorm voor de restwarmte bron en de warmtevrager, maar de totale beschikbaarheid gedurende 24 uur periode is klein. De goede fit in dit voorbeeld vindt plaats omdat bijvoorbeeld de hete rookgassen van een warmtebehandelingsoven wordt gebruikt om de verbrandingslucht voor te verwarmen voor de ovenbrander. De totale tijd van beschikbaarheid gedurende een periode van 24 uur is zo klein dat er een zorg kan worden geuit over het vermogen en de kapitaalkosten van dit project.

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** de onderste deelfiguur zien we een bron van restwarmte (vaste lijn) bestaande uit het koelwater van de condensor van een airco-installatie die slecht is afgestemd op zijn belasting (streepjeslijn) - de voorverwarmer voor ventilatielucht voor het gebouw. De discrepantie in beschikbaarheid is niet overdag zoals eerder, maar seizoensgebonden.



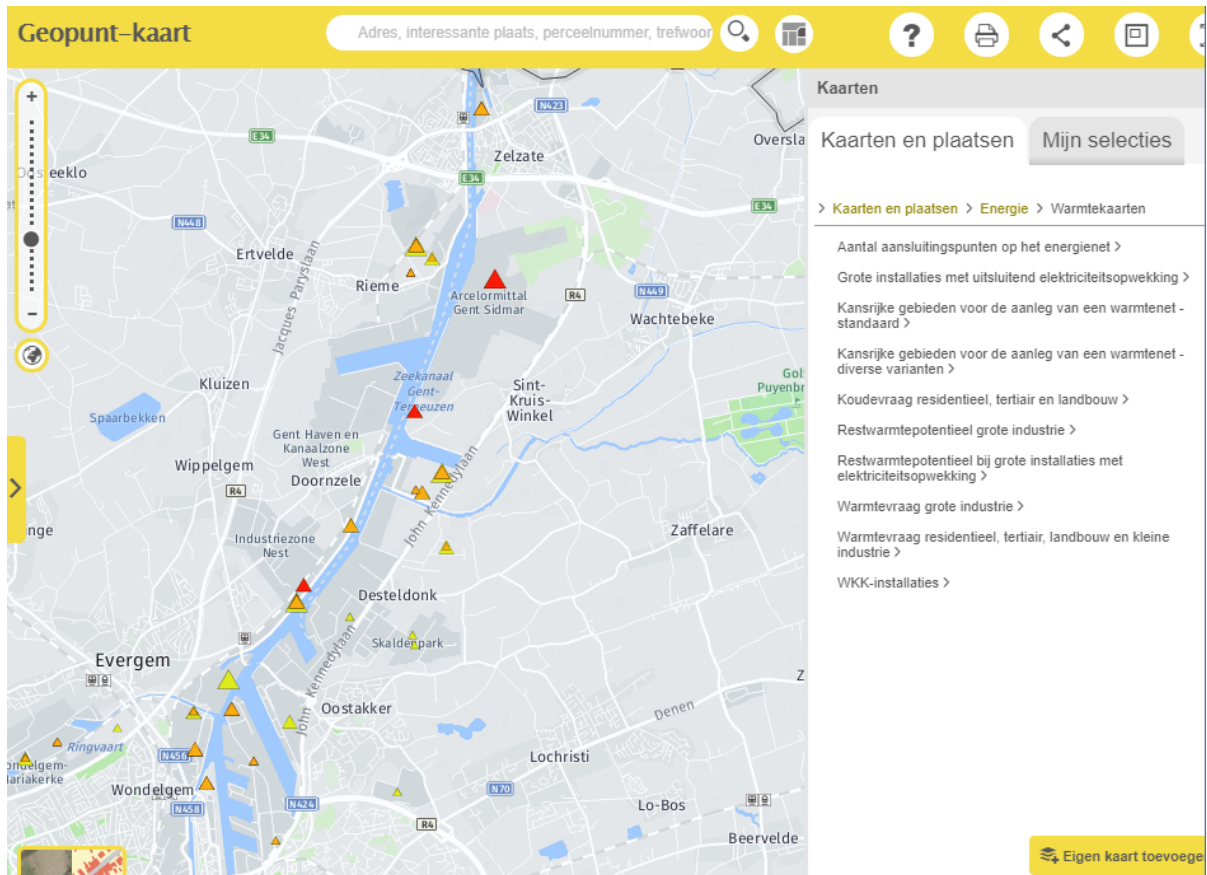
FIGUUR 15 - RESTWARMTE BRON- EN VERBRUIKSPROFIELEN

## 5 Stappenplan voor identificatie en valorisatie van restwarmte

Onderstaand worden enkele stappen gepresenteerd die een energiemakelaar kan ondernemen om na te gaan welke kansen op gebied van restwarmte er mogelijks liggen binnen zijn of haar beschouwde werkingsgebied.

### 5.1 Stap 1 –screening potentiële (rest)warmteproducenten

In deze eerste stap is het de bedoeling om op zoek te gaan naar bedrijven en vestigingen waar mogelijks restwarmte-producerende activiteiten plaatsvinden.



FIGUUR 16 - SCREENCAP VLAAMSE WARMTEKAART - RESTWARMTEPRODUCENTEN (BRON: GEOPUNT VLAANDEREN)

Dit kan de energiemakelaar doen voor de Vlaamse context door gebruik te maken van volgende basisdata:

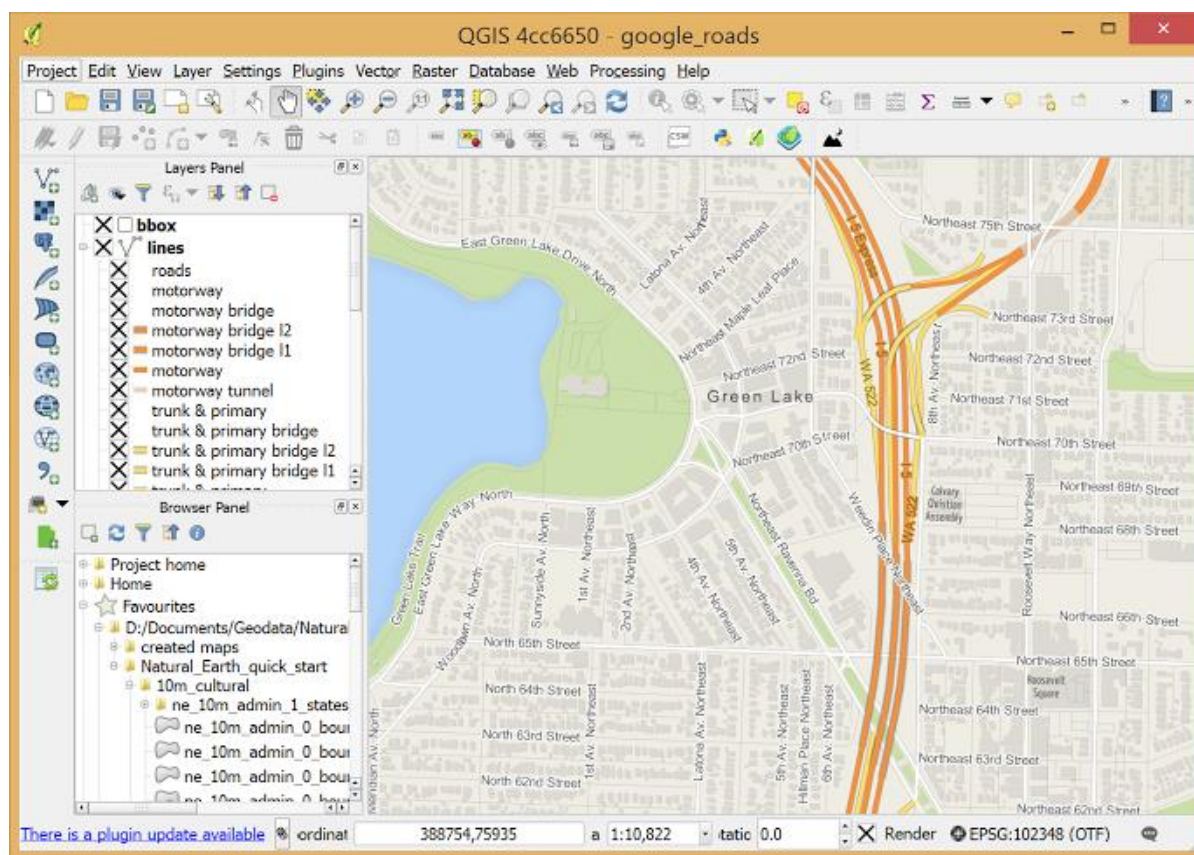
Pan European Thermal Atlas (PETA4)	<a href="http://heatroadmap.eu/peta4.php">http://heatroadmap.eu/peta4.php</a>
Warmtekaarten Vlaanderen	<a href="http://www.geopunt.be/">http://www.geopunt.be/</a>
Lijst met ETS-installaties van bedrijven in Vlaanderen	<a href="https://www.lne.be/eu-ets-vaste-installaties-cijferoverzicht-vlaanderen-toewijzingen-en-emissies">https://www.lne.be/eu-ets-vaste-installaties-cijferoverzicht-vlaanderen-toewijzingen-en-emissies</a>
Lijst met GPBV <sup>2</sup> -bedrijven in Vlaanderen	<a href="https://www.lne.be/overzicht-gpbv-installaties-in-vlaanderen-industrie">https://www.lne.be/overzicht-gpbv-installaties-in-vlaanderen-industrie</a>
Lijst met EBO-bedrijven (VER-bedrijven en niet VER)	<a href="http://www.ebo-">http://www.ebo-</a>

<sup>2</sup> Geïntegreerde Preventie en Bestrijding van Verontreiniging

bedrijven)	<a href="http://vlaanderen.be/Pages/DeEBO's/toegetreden-bedrijven.aspx">vlaanderen.be/Pages/DeEBO's/toegetreden-bedrijven.aspx</a>
Lijst databank Vlaamse bedrijven met vermelding van de NACE code	<a href="https://www.vlaio.be/nl/andere-doelgroepen/lokale-besturen/bedrijfshuisvestingsadvies/data-over-bedrijven-en">https://www.vlaio.be/nl/andere-doelgroepen/lokale-besturen/bedrijfshuisvestingsadvies/data-over-bedrijven-en</a>

Op basis van deze stap kan de energiemakelaar komen tot een potentiële long list van mogelijke locaties waar restwarmte beschikbaar is.

Hierbij kan eventueel een tabel opgemaakt worden waar basisgegevens over deze ondernemingen via geocoding in GIS worden omgezet. GIS helpt om geografische verbanden beter te zien en de analyseren. De meeste lokale besturen beschikken over hun eigen GIS-systemen en medewerkers. Voor zij die nog met GIS moeten starten kunnen zich wenden tot Open Source systemen zoals QGIS die kosteloos gebruikt kunnen worden. ([KLIK HIER](#))



## 5.2 Stap 2 – checken van bedrijfsactiviteiten en warmtenood/ uitstoot

Na de opmaak van de Long List kan gestart worden met het verfijnen van de gegevens en eventueel het verder uifilteren van deze Long List met irrelevante bedrijven.

Dit kan gebeuren door:

- Het checken van de bedrijfswebsite om de bedrijfsactiviteiten en ondernemingsgrootte te kunnen inschatten;

- Het checken van bedrijfslocaties via bijvoorbeeld satellietbeelden. Vanuit deze beelden kan vaak interessante informatie bekomen worden over de set up, omvang, aanwezigheid van specifieke installatie-onderdelen zoals chillers van bepaalde ondernemingen;



FIGUUR 17 - VOORBEELD SATELLIETBEELD VOLVO CARS GENT (BRON: GOOGLE MAPS 2018)

- Het screenen van de ondernemingen op de Long List door ze te vergelijken met de catalogus met typische procestemperaturen die binnen industriële warmtevraagprocessen gangbaar zijn. Zo kan een eerste indruk bekomen worden over de energetische kwaliteit van bepaald warmtevragers en restwarmtestromen.
- Het inlezen op algemene proceskennis van een bepaalde bedrijfstak via desktopresearch door bijvoorbeeld Wikipedia te raadplegen.

Binnen deze stap is het eveneens aanbevolen om na te gaan of er voldoende omliggende bebouwing (binnen enkele kilometer afstand) of andere warmte-intensieve bedrijven gelegen zijn waar de eventuele restwarmte naartoe gebracht zou kunnen worden.

### 5.3 Stap 3 – Aansnijden van het eerste contact met een restwarmtebedrijf

Op basis van de uitgefilterde long list zou *een prioriteitenranking opgemaakt moeten worden* met een selectie van enkele bedrijven waar in eerste instantie nader gesprek mee aangeknoopt kan worden. Deze prioritering kan gebeuren op basis van de hoge temperatuurcategorie waarbinnen de activiteiten vallen, de vermoedelijke omvang van de onderneming en beschikbare restwarmte, de afstand tot mogelijke warmtevragers. Deze prioritering mag grotendeels gebaseerd worden op weloverwogen buikgevoel. Het is aan de volgende procestappen om na te gaan in welke mate het buikgevoel klopt.

In deze stap is het de bedoeling om contact te leggen met de prioritaire restwarmtebedrijven. Hoe je zo'n bedrijfscontact legt en hoe je het gesprek kan onderhouden leer je in de *module rond consultatieve selling*.

De energiemakelaar kan eventueel het bedrijf binnenkomen via een dienstverlening rond energieadvies voor bedrijven, een goed contact met de gemeente of een link met andere bekende figuren voor het bedrijf.

De bedoeling van dit eerste gesprek is om:

1. Toe te lichten wat het opzet is, verwoord vanuit de meerwaardecreatie voor de onderneming;
2. Te toetsen in hoeverre de eerste ideeën over vrijkomende restwarmte, productieprocessen enz. kloppen;
3. Na te gaan welke proceskennis/ drivers/ drempels/ reeds gevaloriseerde restwarmtetoepassingen aanwezig zijn;
4. Engagement te bekomen voor het verder onderzoeken van de kansen voor restwarmtevalorisatie.

Tijdens het interview/ contactmoment tussen de energiemakelaar en het bedrijf kan door de energiemakelaar s gebruik gemaakt worden van *de restwarmtevrage*lijst die binnen het opleidingspakket van DOEN ter beschikking wordt gesteld.

Voorafgaand aan dit gesprek doet de energiemakelaar er niet verkeerd aan om zich grondig in te lezen over de specifieke sectorale kennis van de te bezoeken ondernemingen. Een goede informatiebron hiervoor is het platform waarop *de BBT-studies*<sup>3</sup> zijn gepubliceerd: <https://emis.vito.be/nl/bbt-studies>

Home » Vlaamse studies » BBT studies » BBT voor de sector ziekenhuizen (klik hier voor de [gemeente link](#))

## BBT

Begrip BBT  
BBT in VLAREM  
BBT in de RIE  
BBT en Ecologiepremie  
BBT-kenniscentrum  
BBT nieuws

### Vlaamse studies

BBT studies  
IBBT  
Andere publicaties

### Europese BBT studies

BREFs  
BBT conclusies  
Technieken in opkomst

### Tools

AFSS  
BOSS  
LUSS  
WASS  
BBT-databank  
IBBT  
Stoffiches  
Preventie bodemverontreiniging

## BBT voor de sector ziekenhuizen

Deze BBT-studie wil technologieën en organisatorische maatregelen inventariseren die kunnen helpen om milieuhinder in verzorgingsinstellingen te voorkomen of te beperken. Uit deze inventaris worden de Beste Beschikbare Technieken voor de sector geselecteerd. Bijzondere aandacht gaat uit naar de compartimenten water en afval. De geselecteerde BBT dienen als basis om aanbevelingen te doen naar het beleid en zo een aantal knelpunten op gebied van milieu die binnen de sector bestaan, weg te werken.

De gegevens uit deze studie zijn geactualiseerd tot juli 2003.

De studie [als PDF downloaden](#) (4186 KB)

### Contact

Bij vragen over deze studie kan u contact opnemen met [bbt@vito.be](mailto:bbt@vito.be)

### Tools

De technieken uit deze en andere BBT-studies doorzoeken via de [BBT-databank](#).

### Relevante wetgeving

Deze studie richt zich in hoofdzaak op inrichtingen die thuishoren onder volgende rubrieken uit Bijlage 1 van Vlaam II:

- Poliklinieken en rust- en verzorgingshuizen: [49.1](#)
- Ziekenhuizen: [49.2](#)

Andere relevante milieuwetgeving kan u consulteren via de links naar bovenstaande rubrieken.

### Gerelateerd nieuws

Titel	Publicatiedatum
<a href="#">BBT Farmaceutische Nijverheid en BBT voor Ziekenhuizen &amp; Andere Verzorgingsinstellingen</a>	05/07/2012 - 12:04

FIGUUR 18 - PORTAAL BBT-STUDIES VLAANDEREN

## 5.4 Stap 4 – opstarten van het haalbaarheidsonderzoek

Binnen deze stap kan besloten worden om een haalbaarheidsonderzoek op te starten, wanneer blijkt dat de kansrijkheid van een restwarmteproject bij de prioritaire bedrijven niet wordt ontkracht in vorige stappen.

Deze stap markeert het feitelijke expertiseverschil tussen wat enerzijds van de energiemakelaar verwacht kan worden en anderzijds de injectie van expertenkennis door een gespecialiseerd studie bureau. Het is belangrijk

<sup>3</sup> Best Beschikbare Bedrijfstechnieken



dat in deze stap een studiebureau met bewezen kennis ervaring nader technisch-economisch onderzoek zal verrichten naar de haalbaarheid van een restwarmtekoppeling.

Het is van groot belang dat het aangestelde studiebureau over aangetoonde ervaring (liefst met detailengineering ) beschikt binnen de specifieke sectoren van de beoogde restwarmtebedrijven. Dit heeft enerzijds te maken met de betrouwbaarheid van de studie-uitkomsten en anderzijds met een vertrouwen dat een restwarmtebedrijf moet kunnen stellen in de kwaliteit van aangestelde studiepartners.

Niet zelden kan een restwarmteproducent voorstellen om haar eigen vaste studiepartners ter ondersteuning of ter uitvoering van de haalbaarheidsstudie mee naar voren te schuiven.

## 6 Restwarmtesectoren

Binnen dit hoofdstuk wordt een niet-limitatief overzicht gegeven van restwarmte-intensieve sectoren. De studie "Industrial Waste Heat Recovery, 2004" vormt hiervoor de basis en beschrijft een aantal industriële sectoren naar restwarmtebronnen en beschikbaarheid van de restwarmte. Daarnaast worden mogelijke valorisatietoepassingen van de restwarmte binnen- en buiten de site aangehaald evenals ervaringen met activiteiten voor terugwinning van restwarmte en belemmeringen van restwarmteterugwinning. (Industrial Waste Heat Recovery, 2004)

Traditioneel worden de volgende sectoren als belangrijkste industriële restwarmteproducerende sectoren aangehaald:

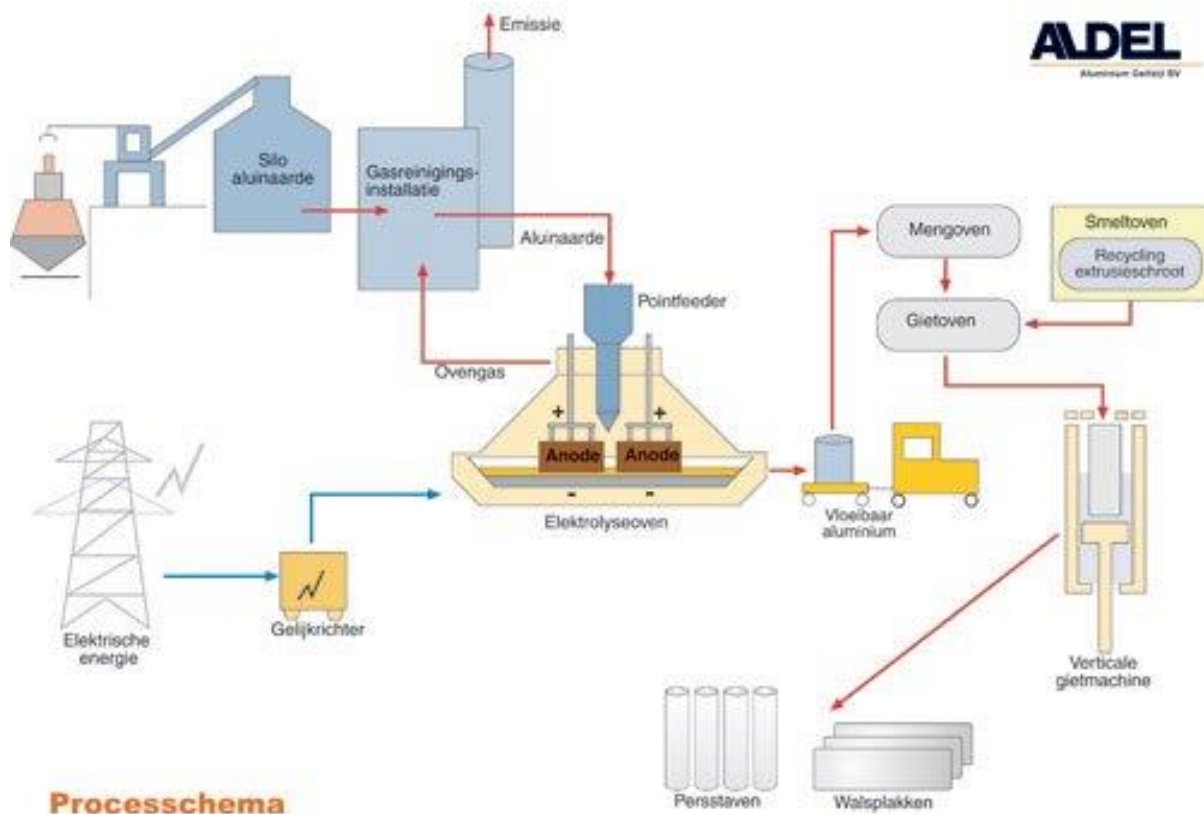
- Aluminium - primaire productie
- Aluminium - Recycling en het secundair smelten
- Staal - Geïntegreerde staalfabriek
- Staal – Mini fabriek of Elektrische boog oven fabriek
- Glas - Productie van glas(vezel)
- (Petro) Chemische Raffinage – Hoofdactiviteiten
- Papier - Papierfabriek
- Voeding - Voeding productie
- Cement - Droog- en schachtovens
- Coatings - Vinyl Coating fabriek

### 6.1 Aluminium

#### 6.1.1 Primaire aluminiumproductie

(Voorafgaande noot: Deze paragraaf is vooral van toepassing voor Nederland en niet voor België gezien België geen primaire smelters van aluminium kent.)

### 6.1.1.1 Productieproces



FIGUUR 19 - VOORBEELD PRODUCTIEPROCES PRIMAIR ALUMINIUM (BRON: ALDEL)

#### Bauxiet als basis

- Aluminium wordt gewonnen uit bauxiet. Bauxiet is de benaming voor het erts waar ongeveer 30 tot 54% aluminiumoxide in zit. Omdat aluminium de sterke neiging heeft om zich te binden met zuurstof, vindt men in de natuur namelijk geen zuiver aluminium. Aluminium is alleen aanwezig in de vorm van een oxide, metaal gebonden aan zuurstof. En deze aluminiumoxide zal dus onttrokken moeten worden uit het eerdergenoemde bauxiet.
- Bauxiet wordt voornamelijk gewonnen in (sub)tropische gebieden, aangezien het bauxiet daar de grootste hoeveelheid aluinaarde bevat. Aluinaarde is de benaming voor zuivere aluminiumoxide. De onttrekking van aluinaarde aan het bauxiet vindt meestal plaats in de buurt van de bauxietwinning, om te besparen op transportkosten.

#### Van Bauxiet naar aluinaarde

- De aluinaarde wordt aan het bauxiet onttrokken door het zogenaamde Bayerproces, benoemd naar de uitvinder van het proces, Karl Bayer (in 1887). Hiervoor wordt een grote hoeveelheid bauxiet aangevoerd en fijngemalen. Vervolgens wordt dit bauxiet in een groot vat gestort, waar verwarmd natronloog aan toegevoegd wordt. Natronloog is een oplossing van bijtende soda en water. De natronloog lost het aluminiumoxide op die zich in het bauxiet bevindt. De overige bestanddelen van het bauxiet lossen niet op.
- Het vloeibare mengsel van natronloog en het daarin opgeloste aluminiumoxide wordt 'slurry' genoemd. De overgebleven substantie van het bauxiet is rode slib, ook wel 'red mud' genoemd. De slurry wordt gescheiden van de red mud door middel van filters. Red mud wordt als afval weggevoerd.

Vervolgens wordt de slurry afgekoeld en overgebracht in precipitatietanks, ook wel precipitatoren genoemd. In deze tanks ontstaan kleine witte kristallen in de vloeistof, die naar de bodem zakken. Vanaf daar worden ze overgepompt naar een volgende tank, waar de kristallen verder kunnen groeien.

- Daarna worden de kristallen overgebracht naar een oven, waar ze op een temperatuur van 1000°C omgezet worden in aluinaarde. Deze aluinaarde ziet eruit als een fijn wit poeder, welke verder bewerkt kan worden om zuiver aluminium te verkrijgen.

#### Het elektrolyseproces

- De aluinaarde wordt getransporteerd naar de primaire smelters, ofwel aluminiumfabrieken. Deze bevinden zich vaak op locaties waar goedkope en relatief schone energie opgewekt kan worden. Bij deze primaire smelters wordt van aluinaarde zuiver aluminium gemaakt met behulp van het zogenaamde 'Hall-Héroult-proces'. Dit proces is genoemd naar twee uitvinders die in 1886 ongeveer gelijktijdig de methode uitgevonden hebben, zonder het van elkaar te weten.
- Aluinaarde bestaat uit aluminium en zuurstof, en het doel van het Hall-Héroult-proces is het scheiden van de twee. De aluinaarde wordt daarvoor in een reductievat gestort. Dit vat is gevuld met het fluoridenzout kryoliet, wat op een temperatuur van 1000°C is gebracht. De binnenzijde van het vat is bedekt met grafiet. Daarnaast hangen er in het vat twee anode-blokken, van koolstof.
- Tussen de anode-blokken en het grafiet wordt een elektrische spanning opgewekt, met een lage spanning (4-5 Volt), maar een enorm hoge stroomsterkte van 220.000-340.000 Ampère. Deze elektrische stroom scheidt de zuurstof van het aluminium. De zuurstof bindt zich aan de koolstof van de anode-blokken en wordt afgevoerd in de vorm van CO<sup>2</sup>. Het zuivere aluminium zakt naar de bodem, waar het vloeibare materiaal wordt afgetapt. Vervolgens wordt het vloeibare aluminium in vormen gegoten, zodat deze verder bewerkt kunnen worden voor diverse toepassingen.

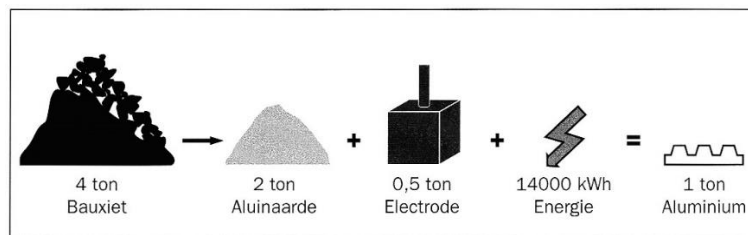
#### Vrijkomende afvalstoffen

- Het onttrekken van de aluinaarde uit het bauxiet levert een afvalproduct op, een rode substantie genaamd red mud. Op kleine schaal wordt de red mud gebruikt voor de kleuring van dakpannen, als vulmateriaal voor asfaltwegen en voor waterzuivering.
- Echter is het grootste deel van de red mud niet economisch bruikbaar. Deze rode slib wordt opgeslagen in bekkens met een ondoordringbare kleibodem. Daar heeft het 5 tot 10 jaar nodig om het achtergebleven natronloog te neutraliseren. CO<sup>2</sup> vanuit de lucht of regenwater zorgt ervoor dat het restant natronloog geneutraliseerd wordt tot een overblijfsel van soda en water.
- Tijdens het elektrolyseproces bestaat het afval en de emissies vooral uit fluoremissies en puin dat vrijkomt bij het vervangen van de deklaag van het vat. Bij het vervangen van deze deklaag komt fluorhoudend puin vrij. Er zijn al projecten gestart om het fluor uit dit puin terug te winnen voor hergebruik. Deze projecten zullen naar verwachting rond de periode 2023 - 2028 geperfectioneerd zijn en op grote schaal toegepast kunnen worden. Ook het vervangen van de anode-blokken levert afval op in de vorm van koolstofblokken. Deze blokken worden als brandstof en grondstof geleverd aan de staal en cementindustrie.

#### **6.1.1.2 Energieverbruik en –recuperatie bij aluminiumproductie**

De omzetting van aluinaarde naar zuiver aluminium vereist door de hoge benodigde stroomsterkte veel energie. Om die reden wordt aluinaarde verder bewerkt op locaties waar eenvoudig en relatief schoon de

benodigde energie opgewekt kan worden. Vaak maken de primaire smelters op deze locaties gebruik van waterkrachtcentrales of kerncentrales.



FIGUUR 20 – OMZETTINGSVERHOUDING PRODUCTIE PRIMAIR ALUMINIUM (BRON: [HTTP://WWW.ROVAL.NL](http://www.roval.nl) )

#### Raffinage: Calcinatië

- Een hoog percentage van de totale benodigde energie nodig bij de productie van aluminium wordt verbruikt in het calcinatiëproces<sup>4</sup>. (zie: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Calcinatië> ) De restwarmte uitstoot van het calcinatiëproces heeft een sterk herwinningspotentieel. De uitstoot bestaat uit een aanzienlijke hoeveelheid vocht (ongeveer 50%) en is gecontamineerd met aluminium partikels op een relatieve lage procestemperatuur van 185-200°C. De uitdaging om restwarmte te herwinnen uit deze uitstoot ontstaat voornamelijk door de lage temperatuur en de contaminatie aanwezig in de uitstoot waardoor warmtewisselaars kunnen falen.
- Er is ook een mogelijkheid om warmte terug te winnen uit cokes afgasbrander bij procestemperaturen van 1.040-1.090 °C om stoom of elektriciteit te produceren, maar dit is eerder een businesscase en economisch beslissing in plaats van een O&O-behoefte.

#### Smeltproces: Elektrolysecellen

- Er is goed potentieel voor warmteterugwinning bij elektrolyse cellen. De zijwanden- en eindwanden vertegenwoordigen een warmteverlies van 15% -20% terwijl de afgassing ongeveer 15% energieverlies vertegenwoordigt. Het zou mogelijk zijn om een thermo-elektrische toestel op de wanden te bevestigen, die bedekt is met een stalen schaal. Toegankelijkheid hangt af van de ouderdom van de potten en geometrie. Naast het energetische aspect van warmteterugwinning kunnen er bijkomende voordelen optreden als de hete lucht die wordt gegenereerd, door natuurlijke convectie, rond de cellen kan worden opgevangen en verwijderd. Zo kan een stabielere werking en een verbeterde werkomgeving worden bekomen.

#### Anode productie

- Door de verbranding van fossiele brandstoffen gaat de productie van aluminiumanodes gepaard met het ontstaan van warme rookgassen. Deze uitlaatgasten vertegenwoordigen een substantieel warmteverlies maar bevatten een aanzienlijke hoeveelheid vluchtige- en teerstoffen. De rookgassen met een proces temperatuur van 200°-400°C bevatten een grote luchtvermaat. De "Pitch Burn technology" wordt steeds zuiverder en bezit een aantal toekomstige opportuniteiten.

<sup>4</sup> Calcinatië of calcineren is een scheikundig proces waarbij gebonden metalen (in ertsen of andere vaste stoffen) onder verhitting worden omgezet in het oxide (calcinaat), in poedervorm, as of stof, of een faseovergang ondergaan.

## 6.1.2 Aluminiumsmelters

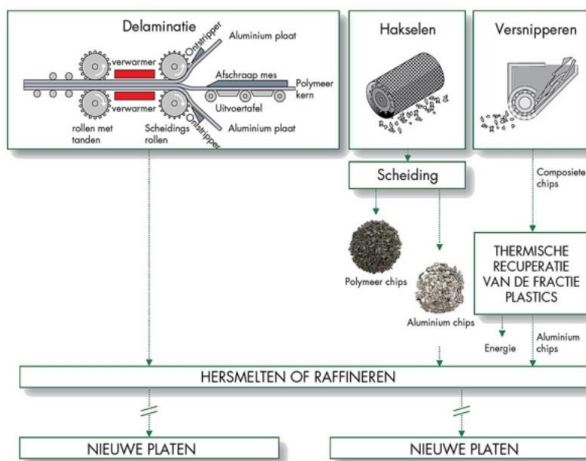
Eenzijds gebruiken bufferovens een koude lading om het oververhitte metaal af te koelen of om de productie te vergroten. De ovens werken op semi-continue of batchgewijs en resulteren in variabele uitlaatgasstromen en procestemperaturen. De meeste smeltovens zijn gasgestookt waarbij de rookgassen waterstoffluoride kunnen bevatten - meestal minder dan 1 ppm - maar in sommige gevallen kan dit 5-10 ppm zijn. Hoge waterstoffluoride concentraties beperken het gebruik van conventionele warmtewisselaars om warmte terug te winnen. Warmteverliezen uit deze ovens kan gecategoriseerd worden als restwarmte met een lage impact, (o.w.v. het batchpatroon) en een hoge complexiteit. Anderzijds, produceren smeltovens een grote hoeveelheid warme rookgassen.

De rookgassen bevinden zich op een hoge procestemperatuur meestal hoger dan 870 °C - en kunnen deeltjes, organische dampen bevatten, en kunnen worden ingedeeld in dezelfde categorie als rookgassen afkomstig van het smelten in gasovens.

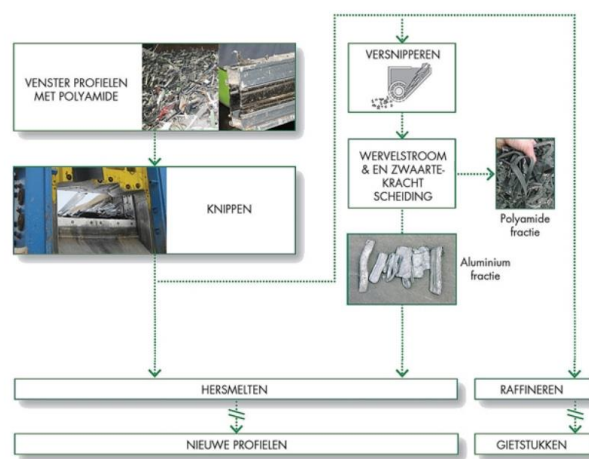
Het scheiden van deze verontreinigingen bij hogere procestemperaturen kan worden beschouwd als een nood die de aluminiumsector overschrijdt.

### 6.1.2.1 Aluminium – Recycling en secundaire smelten

#### PROCESFLOW VOOR HET RECYCLEREN VAN PANELEN EN LAMINATEN

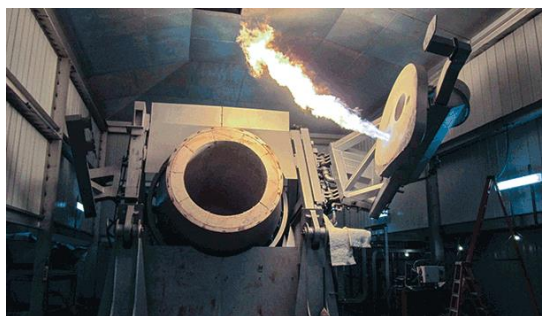


#### PROCESFLOW VOOR DE RECYCLAGE VAN GELAKTE EN THERMISCH ONDERBROKEN ALUMINIUM VENSTERPROFIELEN



Hieronder volgt een opsomming van verschillende types van restwarmtebronnen bij de recyclage en secundaire smeltprocessen van aluminium:

Bij het smelten van aluminiumschroot in gietovens of reverberatory ovens komt veel restwarmte vrij. De rookgassen bevinden zich in het procestemperatuur bereik van 790°C tot 1090°C en bevatten geen verontreinigingen. Ze bevatten ongeveer 60% van de totale toegevoerde energie en genieten de voorkeur om als voorverwarming van verbrandingslucht te dienen.



Figuur 21 - TRF oven

Restwarmte uit liftende rotatie ovens (Tilt Rotary Furnace TRF) zijn relatief koud en bevatten een grote hoeveelheid verontreinigingen. Het massadebiet is cyclisch en vaak onvoorspelbaar. Momenteel is er geen breed gedeelde methode om de restwarmte uit deze gassen terug te winnen. De verdere ontwikkeling van een lagedrukfilter of textielmateriaal bestand tegen hogere temperatuur kan helpen om de rookgassen te reinigen zodat ze kunnen worden gebruikt als warmteterugwinningsbron.

Ontlakkingsystemen verwijderen vluchtige materialen uit de gebruikte drankblikjes en verwarmen ze voor op een procestemperatuur van ongeveer 480 ° C voordat ze worden afgevoerd. De voorverwarmde maar gedeeltelijk gekoelde gebruikte drankblikjes worden opgeladen in de reverberatory ovens. Ontlakkingsystemen maken gebruik van een gasbranders die vluchtige stoffen uit de verlaag op de gebruikte drankblikjes verbrandt. De rookgassen van de unit zijn relatief schoon en worden afgevoerd bij een procestemperatuur van ongeveer 340 ° C. Er is geen warmteterugwinning van deze gassen.

Noot: Hergebruik van aluminium bespaart 90% tot 95% van de energie die nodig is voor productie primair aluminium.<sup>5</sup>

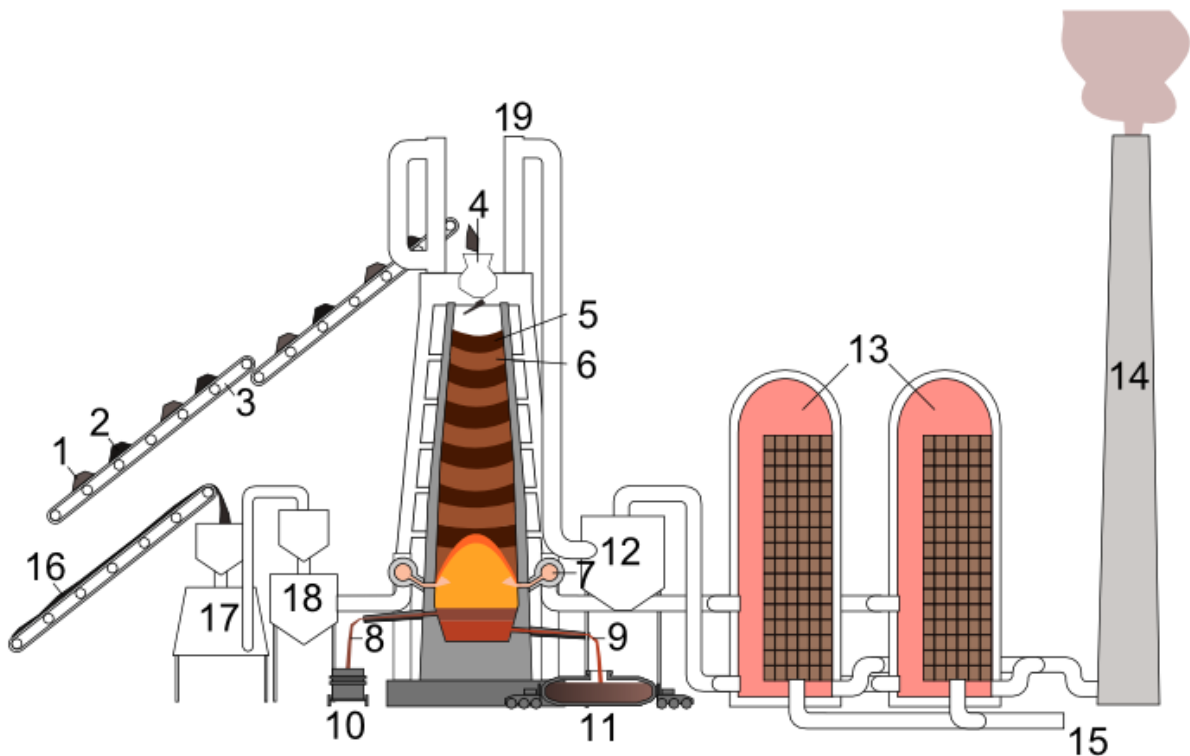
## 6.2 Staalsector

### 6.2.1 Geïntegreerde staalfabriek

Werking van een Hoogoven:

---

<sup>5</sup> Zie: Van grondstof tot Aluminium; Aluminium Centrum; 2011; [KLIK HIER](#)



Figuur 22 - Hoogoven staalproductie (bron: Wikimedia Commons)

- Bovenaan de hoogoven worden afzonderlijke lagen cokes (2,5) en lagen sinter, ijzeroxidepellets & stukerts (1,6) geladen. Een alternatief is om sinter te laden (Sinter is een sterk en poreus materiaal van ijzererts, cokes, kalk en vloeimiddel) beneden. Aan de blaasmonden, wordt hete lucht (7, ongeveer 1200°C, voorverwarmd in warmtewisselaars 13) en poederkool (16) ingeblazen, eventueel verrijkt met zuurstof.
- De zuurstof uit de lucht verbrandt de koolstof uit de cokes en poederkool onder vorming van koolstofmonoxide (CO). Het CO-gas, dat een temperatuur van ongeveer 2200-2400 °C heeft, stijgt op door de lagen cokes en erts. De ijzeroxiden in de sinter, pellets en stukertsen reduceren onder deze omstandigheden tot ijzer, en smelten tot vloeibaar ijzer. Dit vloeibaar ruwijzer sijpelt nu door de cokeslagen naar beneden en verzamelt zich onder in de hoogoven (de zogenaamde haard van de hoogoven).
- Wanneer er zich voldoende vloeibaar ruwijzer heeft verzameld in de haard, wordt de hoogoven onderaan opengeboord en stroomt het vloeibaar ruwijzer (9) via het tapgat naar buiten. Daar wordt het opgevangen in mengers (11). Dit zijn treinwagens met een torpedovormig voorraadvat met vuurvaste binnenbekleding. Deze worden getransporteerd naar de staalfabriek voor verdere verwerking. Wanneer al het ruwijzer uit de hoogoven is afgetapt, wordt het tapgat weer dichtgemaakt. Het aftappen duurt ongeveer 90 minuten.
- Sinter, pellets en stukertsen bevat naast ijzeroxides ook onzuiverheden waaronder calciumoxide (CaO) en siliciumdioxide (SiO<sub>2</sub>). Deze materialen smelten ook en vormen de slak (8), die samen met het ruwijzer wordt afgetapt (10) en verwerkt in o.a. de cementindustrie.

Energiereducatie uit hoogovens:

- Een hoogoven gebruikt een hete luchtstraal verrijkt met zuurstof om de productie te verhogen. Sommige fabrieken gebruiken een aardgasinjectie en koleninjectie. De voorverwarmde lucht wordt



gebruikt in een procestemperatuurbereik van 1.066 – 1.122 °C en bevat 5%-10% toegevoegde zuurstof. De warme lucht bevat verschillende contaminaties (bv. Zwavel), en dient eerst gereinigd te worden in bv. een gaswasser. Bij hete lucht hoogovens bevat het rookgas deeltjes en condenseerbare materialen die eerst dienen aangepakt te worden indien warmterecuperatie wordt beoogd.

- Voor de energieproductie van stoom, worden boilers gebruikt waarbij de procestemperatuur van de rookgassen gemiddeld 370°C kan bedragen met een zuurstofgehalte tussen de 3-7,5% en vrij zijn van contaminaties. Deze boilers gebruiken hoogoven gas of cokesoven gas als brandstof. Deze rookgassen kunnen gebruikt worden als voorverwarming voor het hoogoven- of cokesoven gas of als lage-temperatuur energiebron (indien het economisch te rechtvaardigen is). Indien nodig kan deze restwarmte worden aangewend om proceswater voor te verwarmen. De lage-druk stoom kan worden gecondenseerd en hergebruikt als voedingswater in het ketelwatersysteem.

Cokesovens en cokesoven gas verwerkingsinstallaties:

- Cokes sites kunnen verschillende “cokesoven batterijen” bevatten (dit zijn meerdere ovens in een rij). Grote sites hebben bijkomende processen om de bijproducten die ontstaan in het maakproces van de cokes te verwijderen. De sites gebruiken grote stoomketels die hoge druk stoom produceren met cokesoven gas als brandstof en additioneel aardgas als bijkomend gas.
- Restwarmte kan gerecupereerd worden vanuit de warme cokes batterijen. Grote hoeveelheden warmte gaan verloren bij het “schrikken” van de cokes. De captatie van deze restwarmte is al succesvol toegepast op verschillende sites en is commercieel interessant.
- Het warm cokesoven gas dat wordt afgevoerd vanuit de cokesbatterijen op een procestemperatuur van ongeveer 815°C bevat verschillende verontreinigingen. Het gas wordt geschrikt naar een procestemperatuur van 82°C en daarna verder gekoeld naar 30°C. Deze warmte komt beschikbaar als warm water afkomstig van het cokesoven gas koelsysteem.
- De rookgassen van cokesoven batterijen bevinden zich op een procestemperatuur van 200-320°C en kunnen als relatief zuiver worden beschouwd. Deze rookgassen worden uitgestoten in de atmosfeer en kunnen eventueel aangewend worden voor warmterecuperatie.

Walserij:



Figuur 23 - Warmwalserij (bron: Arcelor Mittal Belgium)

- Binnen de staalwalserij kan er een onderscheid gemaakt worden in de warmwalserij en de koude walserij. Binnen een warmwalserij worden de continu gegoten plakken in het plakkenpark van de warmwalserij gesorteerd. Voordat de plakken kunnen worden gewalst, moeten ze worden opgewarmd tot een temperatuur tussen 1.000 en 1.270 °C. Dat gebeurt in de opwarmovens van de warmwalserij. Een plak die uit de oven komt, heeft een oxidehuid, die wordt verwijderd. Dat gebeurt in een oxidebreker, die elke plak aan de boven- en onderzijde afspuit met een waterstraal onder een druk van 120 bar. Daarna wordt de plak in verschillende stappen gewalst. In de voorwalsgroep, die bestaat uit een omkeervoorwalstuig en een continuvoorwalstuig, wordt de dikte van de plak herleid tot ongeveer 3 cm. In de eindwalsgroep wordt de einddikte bereikt. Voordat de plaat de eindwalsgroep in gaat, wordt ze nogmaals van haar oxidehuid ontdaan. De eindwalsgroep bestaat uit zeven opeenvolgende walstuigen. Elk walstuig maakt de staalplaat progressief dunner en langer. Zodra de plaat de walsgroep verlaat, worden de dikte, de breedte, het profiel, de vlakheid en de temperatuur van de plaat gemeten. Voordat de plaat opgewikkeld wordt, wordt ze met waterstralen gekoeld tot de gewenste temperatuur.
- In de koudwalserij wordt eerst de oxidehuid verwijderd die zich na het warmwalsen op de staalplaat heeft gevormd. Dat gebeurt in beitsreijen, waarin de staalplaat behandeld wordt met een zoutzuuroplossing. In de tandemwalsgroepen wordt de staalplaat koudgewalst tot de gewenste einddikte bereikt is. De tandemwalsgroep bestaat uit aaneengeschakelde walstuigen, die de staalplaat progressief verdunnen. Na het koudwalsen is de staalplaat verhard en kan ze niet meer verder worden verwerkt. Daarom moet het staal een warmtebehandeling ondergaan. Dat kan in onze stapelgloeierijen of in onze continugloe- en afwerkingslijn.<sup>6</sup> De continugloe- en afwerkingslijn is uitgerust met een hardingswalstuig, waarmee de staalplaat de nodige verlenging, ruwheid en vlakheid krijgt. Staalrollen die gegloeid werden in de stapelgloeierij, krijgen die bijkomende behandeling in de hardingswalserij, waar zulke hardingswalstuigen zich bevinden.
- Het walsen en afwerken van staal gebeurt typisch via naverwarmingsovens, gloeiovens en continue gloeilijnen. De ovens gebruiken aardgas, hoogovengas en cokesovengas als gemengde brandstof.

<sup>6</sup> Bron: arcelor mittal; 2018; <https://belgium.arcelormittal.com/werkomgeving/koudwalserij/>

De procesuitgangstemperatuur van de platen is 1.180 °C en de ovens bevatten meestal een warmterecuperator om verbrandingslucht voor te verwarmen.

- De rookgassen zijn relatief schoon (vrij van deeltjes of condenseerbare dampen) en bevatten in sommige gevallen grote hoeveelheden overtollige lucht. Het verlagen van de zuurstof en het terugwinnen van warmte met behulp van betere recuperatoren kan een groot voordeel opleveren.
- Stralingswarmte komt meestal voor in het laad- en afvoeruiteinde evenals in andere gebieden. De industrie recupereert normaal niet de restwarmte van de gewalste vormen.
- De rollen van de walsen worden gekoeld met koelwater dat eventueel ook gebruikt kan worden voor warmterecuperatie.

## 6.2.2 Staalfabriek - recuperatiestaal

Een vlamboogoven, ook wel elektrische boogoven of lichtboogoven genoemd, is een oven waarin het materiaal wordt opgewarmd door een vlamboog tussen de elektroden en het materiaal. De voornaamste toepassing is in de staalindustrie. Het gebruik is doorheen de jaren wereldwijd sterk toegenomen door de lage investeringskosten en de flexibele toepassing voor het produceren van verschillende, hoogwaardige staalsoorten. Ook kan de oven werken met 100% schroot als ijzerbron.



Figuur 24 - Vlamboogoven (bron: Wikimedia Commons)

De vlamboogoven is geen vervanger van de hoogoven, daar een hoogoven gebruikt wordt om van uitsluitend ijzererts ruwijzer te maken. Ook dit ruwijzer kan in de vlamboogoven verder verwerkt worden tot staal. Nadelen van de vlamboogoven zijn het hoge geluidsniveau, de productie van stof en het energieverbruik. Een oven met een capaciteit van 35 ton (afsteekcharge) en een voedingsbron van 50 MW heeft een gemiddeld vermogen van +/- 25 MW. Moderne installaties beschikken over een geluiddempende omkasting en een stofafzuiging om de nadelen te beperken.

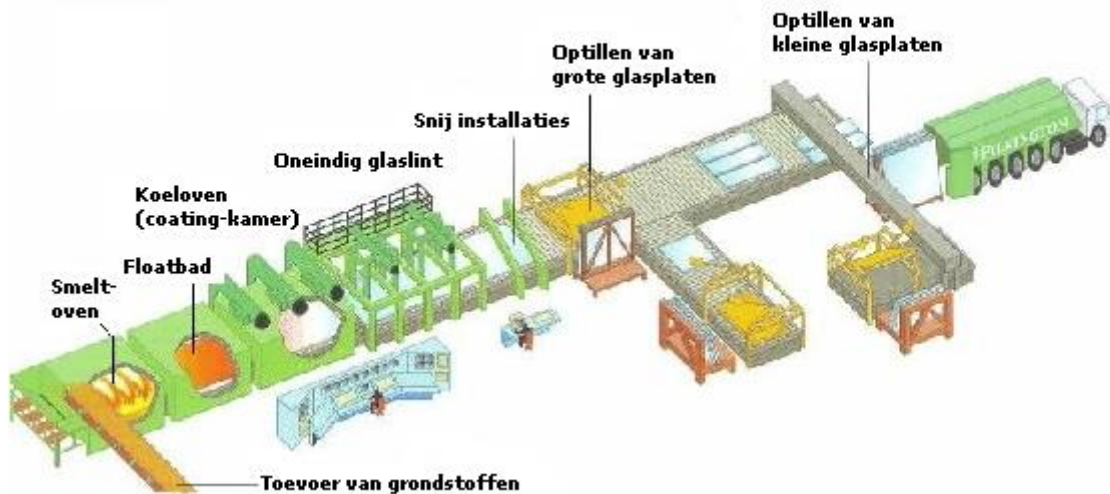
In de vlamboog kan de temperatuur oplopen tot 7000 K (6726,85 °C). De regeling van de temperatuur is afhankelijk van de aangelegde spanning, de stroomsterkte en de afstand tussen het materiaal en de elektrode(s).

Restwarmte van gassen die door elektrische boogoven (=EAF) worden geloosd zijn heet en bevatten grote hoeveelheden verontreinigingen. Bovendien is de massastroom cyclisch en vaak onvoorspelbaar. Momenteel bestaat er door de industrie geen haalbare geaccepteerde methode om chemische en voelbare warmte uit deze gassen terug te winnen.

### 6.3 Glas - Productie van glas(vezel)

Wanneer we spreken over de moderne productiemethoden van las, dan dienen we onderscheid te maken tussen primaire en secundaire fabricage.

- Primaire glasfabricage: Hieronder verstaan we het onder hoge temperaturen smelten van grondstoffen voor het vervaardigen van blank of gekleurd 'basisglas' met als belangrijkste producten: floatglas, figuurglas en draadglas.
- Secundaire glasfabricage: Onder secundaire glasfabricage verstaan we het op fabrieksmatige wijze, bewerken of verwerken van het bovengenoemde basisglas tot glasproducten met andere eigenschappen dan het basisglas. We denken dan onder meer aan: gehard glas, gelaagd glas, verzilverd glas, isolerend dubbelglas en gecoat glas.
- Fabricageproces van floatglas: Floatglas is glas van het zogenaamde 'zand-kalk-soda-type'. Hoewel de samenstelling van de grondstoffen per fabrikant niet altijd gelijk is, is deze over het algemeen als volgt.
  - Zand (Silicium)  $\text{SiO}_2$
  - Kalk  $\text{CaO}$
  - Soda  $\text{Na}_2\text{O}$
  - Scherven glas
  - onder toevoeging van geringe hoeveelheden andere oxiden.



Figuur 25 - float glas procede (bron: Pilkington)

- Een floatglasoven bevat als regel ongeveer 500 à 600 ton glas in vloeibare vorm. In zo'n grote glasoven vindt de verhitting tot 1500° Celsius plaats door branders ter weerszijden in de oven, waarbij de branders dus aanwezig zijn boven het glasbad. Dit betekent dat boven in het glasbad een hogere temperatuur is (1500° Celsius) dan onder in het glasbad (zo'n 1270 tot 1300° Celsius). Dit houdt in dat de viscositeit bovenin lager is dan onder in het glasbad.
- Voor in de oven worden de 'koude' grondstoffen ingevoerd om achter in de oven als gesmolten glas van circa 1100° Celsius op een tinbad uit te vloeien. In dit het glasbad met verschillende viscositeiten zullen daarom zeer karakteristieke stromingen ontstaan.
- Het vloeibare glas loopt via een zogenaamde 'overflow' in het tinbad, op een dunne laag vloeibaar tin, waarop het zich uitspreidt en blijft drijven (vandaar de naam 'floatglas'). De oppervlaktespanning van glas en tin zijn duidelijk verschillend waardoor het vloeibare glas op het tin kan gaan drijven. Dit is de essentie van het floatprocede.
- Het absoluut vlakke oppervlak van het gesmolten tin doet aan de onderzijde van het glas een volkomen vlak oppervlak ontstaan. Het effect van de oppervlaktespanning in het dik vloeibare glas zorgt ervoor dat de bovenzijde van het glas volkomen vlak is. Om oxidatie van het tin te voorkomen is de lucht boven het tin vervangen door een gasmengsel van stikstof en waterstof, terwijl een lichte overdruk het binnendringen van zuurstof en stofdeeltjes verhindert.
- De temperatuur van het glas daalt geleidelijk van 1100° Celsius op de plaats waar het glas het tinbad binnen vloeit naar 600° Celsius waar het glas in vaste vorm het tinbad verlaat; rollers aan de glasranden helpen het glaslint op de juiste breedte te brengen.
- De dikte van het glas wordt onder andere bepaald door de snelheid waarmee het glas over het tin wordt getrokken. Als het glas het tinbad verlaat is het in feite gereed. Het wordt nu over rollers door een lange koeltunnel gevoerd waarin de temperatuur geleidelijk verder wordt teruggebracht, zodat het glas aan het einde van de productielijn zowel spanningsvrij is, als een hanteerbare temperatuur heeft. De productielijn heeft een totale lengte van circa 350 m. De breedte van de ononderbroken glasband is ongeveer 3,50 m.

- Tussen het verlaten van de koeltunnel en het automatisch snijden en afnemen van het glas vindt tenslotte een aantal kwaliteitscontroles plaats.

Energieproductie & -recuperatie bij glasproductie:

- Glassmelters kunnen aardgas gestookte branders met voorverwarmde lucht, zuurstof-brandstofbranders of elektriciteit gebruiken als warmtebron voor het smelten van glas. De brandstof gestookte systemen kunnen gebruik maken van een elektrische boost om de warmte van gasgestookte branders aan te vullen.
- Bronnen van restwarmte omvatten rookgassen uit de oven en kanalen. Deze gassen bevinden zich op zeer hoge procestemperaturen boven de 1.370 ° C en bevatten een grote hoeveelheid verontreinigingen, zoals anorganische deeltjes en dampen van elementen die kunnen condenseren. De aard van de elementen hangt af van het type glas en de manier van werken. Deze gassen worden afgekoeld door grote hoeveelheden lucht te mengen. Sommige glasfabrieken maken gebruik van een recuperatiesysteem. De procestemperatuur van de rookgassen die wordt afgevoerd uit de filterkasten kan oplopen tot 230 °C.
- Het vervezelingsproces gebruikt grote hoeveelheden aardgas om de vereiste procestemperatuur te kunnen handhaven. Het verwarmingssysteem kan zeer complex zijn en moet worden afgestemd zodat de glasvezels hun gewenste kwaliteitsspecificaties bekomen. De meeste fabrieken kijken voortdurend naar methoden om het energieverbruik in het systeem te verminderen. De rookgassen bevinden zich door de menging van lucht of stoom op een lage procestemperatuur van soms minder dan 260 ° C.
- Behandelingsovens gebruiken aardgas gestookte branders met recirculatie ventilatoren. De procestemperatuur van de oven varieert afhankelijk van het soort proces en het product dat men wenst te bekomen. Typisch ligt het procestemperatuurbereik van 230 °C tot 290 °C. De rookgassen worden gewoonlijk verbrand om de organische inhoud van de rookgassen te verwijderen. In veel gevallen gebruiken de verbrandingsovens systemen voor regeneratieve warmteterugwinning en worden de rookgassen geloosd op een procestemperatuur van 190 °C.
- Gebouwklimatisatie vertegenwoordigt een belangrijk energieverbruik in glasfabrieken, vooral in koudere gebieden. De verwarmingsenergie wordt doorgaans geleverd door gasverwarmingsunits op verschillende locaties in de fabriek te plaatsen, met name in de afwerking-, verpakking- en transportzones waar geen warmte beschikbaar is van de ovens en de droogoven.

## 6.4 (Petro) Chemische Raffinage – Hoofdactiviteiten

### 6.4.1 Basiswerking

Olieraffinaderijen verschillen in capaciteit en complexiteit. Een zeer kleine raffinaderij verwerkt 2.000 ton ruwe olie per dag, terwijl de grootste raffinaderijen ter wereld 80.000 ton ruwe olie per dag kunnen verwerken. Met de grootte van een raffinaderij neemt meestal ook de complexiteit toe. Bij een toenemende complexiteit kan de werking van de raffinaderij beter worden afgestemd op de beschikbare mix ruwe olies en de gevraagde mix van producten. De verhoogde kosten van de complexere raffinaderij leiden echter pas bij grotere capaciteit tot economisch rendabele operatie ('economy-of-scale').

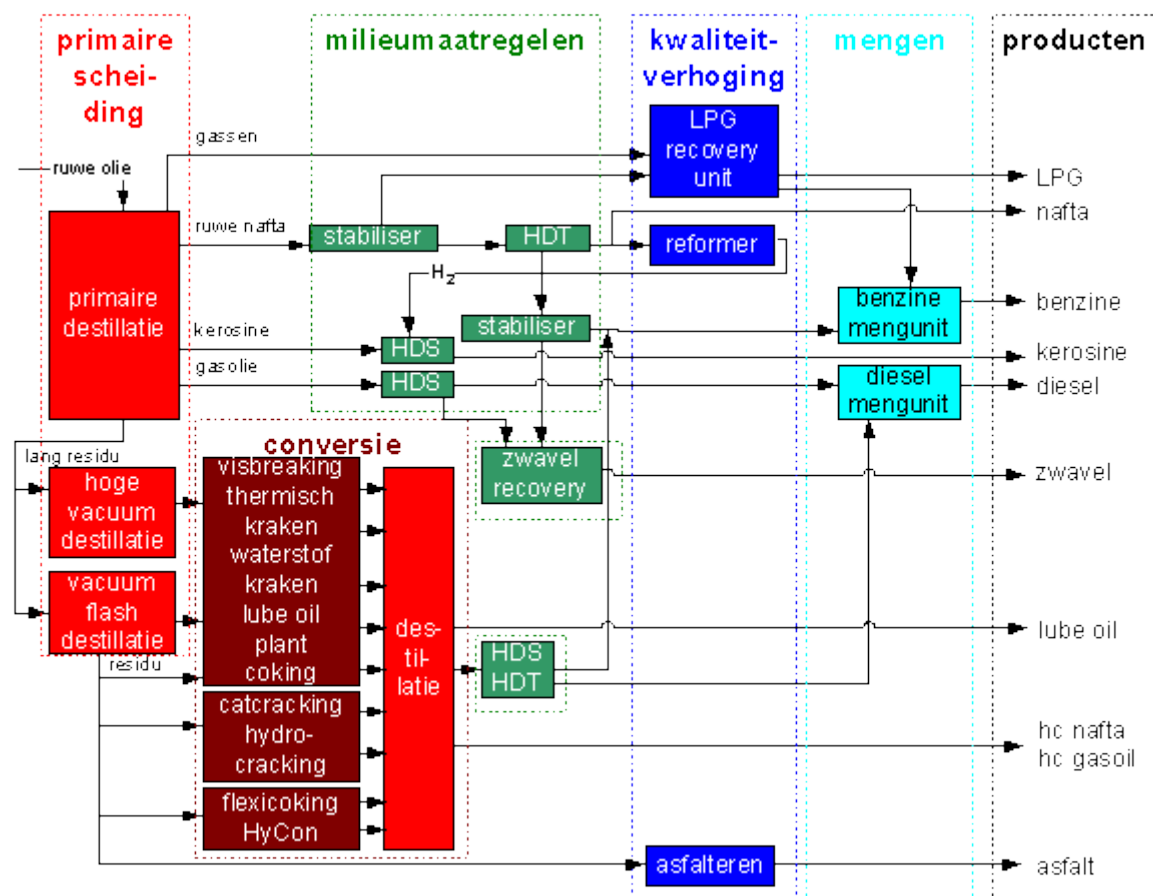
Een eenvoudige, kleine raffinaderij (Hydroskimming raffinaderij) produceert gassen, nafta, kerosine, diesel, en zware brandstoffen. Ruwe olie wordt gedestilleerd tot gasvormige koolwaterstoffen. Dieselbrandstof en zware brandstof komen (bij geschikte ruwe olie) kant en klaar uit de raffinage.

Een eenvoudige raffinaderij bevat de volgende onderdelen:

- Destillatietoren
- Nafta stabiliser
- Hydrotreater
- Katalytische reformer
- Mengunit voor benzine
- Kerosine/diesel ontzwaveling

Een grote, 'integrated' raffinaderij heeft een veel groter scala aan producten dan de 'hydroskimming' raffinaderij. Er kunnen meer dan 1000 verschillende typen aardolieproducten worden geproduceerd. Naast de productencategorieën die ook met een hydroskimming raffinaderij kunnen worden geproduceerd zijn dit LPG, bitumen, aromaten, reformaten, wax, zwavel, coke en 'short-residues'.

Het Block Flow Diagram van zo'n raffinaderij ziet er als volgt uit:



FIGUUR 26 - BFD OLIERAFFINADERIJ (BRON: TU DELFT)

Een geavanceerde raffinaderij bevat naast de onderdelen van een eenvoudige raffinaderij de volgende onderdelen:

- Hoge vacuüm destillatie
- Vacuüm flashed destillatie
- HYdroCONversie van residuen (HYCON)
- Visbreaker
- Flexicoker

## 6.4.2 Restwarmtestromen

Bedrijven in de (petro)chemische industrie produceren een breed scala aan producten uit een verschillende grondstoffen, meestal koolwaterstoffen, en gebruiken grote hoeveelheden brandstoffen om proceswarmte te produceren. Door de diversiteit van activiteiten binnen de (petro)chemische sector zal dit thema enkel de restwarmte behandelen van de (petro)chemische hoofdactiviteiten.

De rookgassen van boilers, gestookte verwarmingssystemen en apparatuur voor de opwekking van elektriciteit zijn schoon, wanneer aardgas wordt gebruikt als brandstof. Hierbij gebruiken de installaties de momenteel beschikbare technologieën om restwarmte te recupereren. De geloosde warmte varieert van in een temperatuurbereik van 95°-180 °C.

Rookgassen van thermische oxidatiemiddelen (TO) worden vaak gebruikt als procesverwarming. De procestemperaturen van de rookgassen variëren van 760° tot 980 ° C en kunnen gechloreerde gassen omvatten of gassen met andere niet-organische verontreinigingen die zeer corrosief zijn. Het gebruik van warmteterugwinapparatuur kan voor de nodige uitdagingen zorgen. De hogere temperaturen en de aanwezigheid van corrosieve gassen maken het gebruik van economisch verantwoorde warmtewisselaars niet mogelijk en in veel gevallen is het noodzakelijk om de gassen te blussen, wat resulteert in verlies van warmte.

Een bijproduct van waterstof, RCL, kan een zeer goede bron van brandstof zijn, het gebruik ervan levert echter problemen op. Veel bedrijven ondervinden problemen bij het terugwinnen of gebruiken van dit bijproduct aangezien RCL HCL wordt, wat de verbranding van dit waardevolle bijproduct in energiecentrales beperkt. Een juiste behandeling om gechloreerde componenten te verwijderen zou het gebruik van deze waardevolle brandstof kunnen verhogen.

Exotherme processen in reactoren kunnen instaan voor de productie van heet water waaruit warmte kan worden gewonnen. Er is op dit moment geen eenvoudige methode beschikbaar voor het terugwinnen van deze warmte.

Logistiek van het verzamelen van stapelgassen en het gebruiken ervan voor het verwarmen van vloeistoffen of gassen vormt een hindernis voor de meeste bedrijven. Het is moeilijk om warmtewisselaars toe te passen door een gebrek aan ruimte bij de bestaande units. Het gebruik van een microkanaal warmtewisselaar is overwogen maar de beschikbaarheid en gebruiksgeschiedenis in industriële installaties is echter bijna onbestaande.

De warme gassen afkomstig van een verdamper (of andere units) bestaan voor een groot percentage als waterdamp en dienen gekoeld te worden tot onder de condensatietemperatuur hun latente warmte terug te winnen.

In veel gevallen beperken de beschikbare watertemperatuur, de eenheid grootte en de kwaliteit van dampen (verontreinigingen) het gebruik van conventionele warmtewisselaars. De ontwikkeling van een condenserende warmtewisselaars in een kleinere grootte zou nuttig zijn bij het terugwinnen van een groot percentage van de warmte die wordt verspild. Deze warmtewisselaars zouden ook resulteren in een netto waterbehoud. Sommige bedrijven hebben het gebruik van doorlaatbare membranen en andere vergelijkbare dampwarmteterugwinningssystemen overwogen zonder veel succes.

In de koolwaterstofverwerkingseenheden wordt warmte “verspild” in grote volumes lage-drukstoom. De terugwinning uit warmte bij deze eenheden wordt gelimiteerd door de beschikbaarheid, de kost om koelwater te verpompen en een beperkte gebruikstoepassing voor het resulterende warme water. Technologieën die het gebruik van de warmte uit de stoombron mogelijk maken, kan een grote hoeveelheid warmteterugwinning mogelijk maken.



De ontwikkeling van luchtgekoelde eenheden, in plaats van watergekoelde eenheden, kan een grote hoeveelheid energie besparen die wordt gebruikt voor het verpompen van water. Het gebruik van luchtgekoelde elementen zal ook het watergebruik verminderen. Water is een zeer waardevolle hulpbron die moeilijk te verkrijgen is voor sommige bedrijven. Het is te verwachten dat watertekorten en hogere waterkosten in de toekomst voor veel bedrijven een grote economische invloed heeft.

De ontwikkeling van nieuwe technieken die kunnen instaan voor een betrouwbare afvoer van afvalgasen, kan leiden tot een energiebesparing. Het periodieke en onvoorspelbare karakter van deze bron is de grote uitdaging.

## 6.5 Papier – Papierfabriek

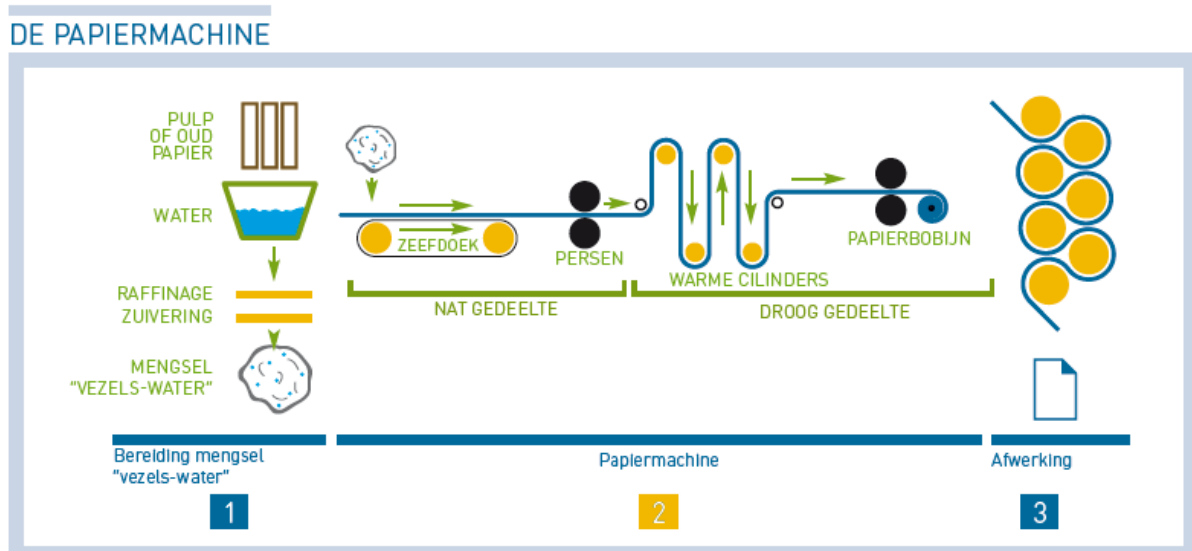
### 6.5.1 Productieproces

Afhankelijk van het feit of de fabriek al dan niet haar eigen pulp produceert (geïntegreerde of niet geïntegreerde fabriek), komt de pulp aan, hetzij rechtstreeks van de pulpfabriek in dunne suspensie, hetzij als gedroogde vellen (commerciële pulp, hoofdzakelijk chemische pulp). De vezels in suspensie brengen in water is een eerste noodzakelijke stap bij de papierproductie (zie schema).

#### Stap 1 - BEREIDING VAN HET MENGSEL "VEZELS-WATER"

Nadat men de vezels in suspensie heeft gebracht, ondergaat het mengsel 'vezelswater' twee voorbereidingen:

- Het raffineren: Hierbij worden de vezels gemalen tussen schijven bezet met messen (refiner). Door dit "raspen" komen er vezelhaartjes los, zodat de vezels zich beter aan elkaar kunnen hechten en er een homogener vezelverdeling op het vel papier plaats vindt.
- Het zuiveren: Vooraleer de pulpsuspensie naar de papiermachine gaat, wordt hij eerst ontdaan van alle vreemde bestanddeeltjes en vezelklonters. Het mengsel vezelswater bestaat nu nog uit meer dan 95% water. Dit water is essentieel voor de volgende stap: de bladvorming.



FIGUUR 27 - PRODUCTIEPROCES PAPIER (BRON: COBELPA)

#### Stap 2 – De papiermachine

Het geraffineerde en gezuiverde mengsel “vezels-water” is nu klaar om naar de papiermachine te gaan. Hier onderscheidt men twee delen: het nat en het droog gedeelte.

Het nat gedeelte: Via de oplooptast wordt de vezelsuspensie gelijkmatig verdeeld op een zeefdoek, de vormzeef. Deze zeefdoek is een weefsel met fijne mazen, waardoor het water geleidelijk afgezogen wordt. Het papiervel bevat bij het verlaten van de vormzeef minder dan 80% water. Het vel papier wordt via doorlopende viltdoeken overgebracht naar de “perspartij”. Hier wordt een maximum aan water aan het vel onttrokken alvorens over te gaan naar het drogen. Aan het einde van de perspartij bevat het papier nog ongeveer 50% water.

Het droog gedeelte: Het drogen van papier is een proces dat veel energie vergt. Het kan gebeuren door:

- Warmtegeleiding: het papier wordt in contact gebracht met een metalen cilinder die met stoom verwarmd is
- Warmteconvectie: warme lucht wordt over het vel geblazen
- Warmtestraling: in bepaalde gevallen worden infrarood stralingspanelen ingezet om de temperatuur van het vel te verhogen. Het vel wordt voortdurend van de ene cilinder naar de andere geleid tot zijn vochtgehalte ongeveer 6% is. Daarna verlaat het vel de “droogpartij” om, indien nodig, een of meer eindbewerkingen te ondergaan.

### Stap 3 – De afwerking

Verskillende eindbewerkingen zijn mogelijk, afhankelijk van de gewenste papiersoort en van de uiteindelijke toepassing die men aan het papier zal geven. De twee belangrijkste zijn:

- Het kalanderen: bij het kalanderen leidt men het papier tussen een aantal gietijzeren rollen die met stoom verwarmd worden. Deze bewerking maakt het oppervlak van het vel gladder en glanzender. Kalanderen verhoogt eveneens de bedrukbaarheid van het papier.
- Het coaten: Bij het coaten brengt men op één of beide zijden van het papier een zogenaamde “strijklaag” aan, die bestaat uit minerale pigmenten zoals calciumcarbonaat, talk of kaolien.

Door deze bewerking krijgt het papier een mooi en egaal oppervlak, waardoor de bedrukbaarheid verhoogt. In de loop van de laatste decennia, is de papierindustrie geleidelijk geëvalueerd naar steeds bredere en snellere papiermachines. Een moderne papiermachine produceert in één uur een vel papier van 10m breed en 120km lang!

Bron: <http://www.cobelpa.be/nl/papier.html>

## 6.5.2 Restwarmtebronnen bij papierproductie

Volgende paragraaf geeft een overzicht van restwarmtebronnen, hun kenmerken en problemen voor een typische papierfabriek die het sulfietproces gebruikt om papier te produceren.

- Het gebruikte water, inclusief water dat wordt geloosd uit een waterzuiveringsinstallatie, bevat verschillende verontreinigingen en onzuiverheden. De warmteterugwinning uit dit water levert geen grote technologische uitdagingen op. De huidige technologie voor chemische behandeling, filtratie en warmtewisseling met een warmtewisselaar kan voldoen aan de warmteterugwinningsvereisten van de installatie
- Afvoerlucht van papiermachinedrogers: De afgevoerde lucht van papiermachinedrogers bevindt zich op een relatief lage procestemperatuur van 60 °-82 °C, bevat een grote hoeveelheid waterdamp en kan kleine, onvoorspelbare hoeveelheden vezels en andere verontreinigingen bevatten die moeilijk te

verwijderen zijn. Vocht in combinatie met vaste verontreinigingen vormt een ernstige bedreiging naar de prestaties van warmteoverdrachtsoppervlakken en het dichtstoppen van luchtdoorgangen.

- Binnen de sector is er een behoefte aan technologieën voor het ontvochtigen van hete lucht met een zeer kleine hoeveelheid vaste stoffen. Het procestemperatuurbereik 60°-82 °C) is te hoog voor gebruik in conventionele ontvochtigingssystemen zoals droogmiddel systemen. Latente warmte-terugwinningssystemen van het membraantype die kunnen worden gebruikt voor temperaturen in dit bereik, kunnen operationele en onderhoudsproblemen met zich mee brengen ten gevolge van de aanwezigheid van verontreinigingen.

## 6.6 Voeding - Voeding productie

Deze paragraaf geeft een overzicht van typische restwarmtebronnen en hun kenmerken voor de verwerking van levensmiddelen, met name voor de voedsel(snack)productie en soortgelijke activiteiten:

- Deze industrie heeft met zijn rookgassen van ketels, gassen van productdrogers en toastovens, schone rookgassen waarvan de procestemperatuur varieert tussen de 150°-316°C met een variabele hoeveelheid vocht. Warmteterugwinning uit deze rookgassen voor conventioneel gebruik zoals verbrandingsluchtvoorverwarming of navulluchtverwarming is mogelijk. Verschillende aspecten, zoals de economische aspecten van de voorverwarming van de verbrandingslucht, het type van de gebruikte branders, de afstanden en lange leidingen kunnen voor de nodige uitdagingen zorgen. Het is mogelijk dat een bedrijf overweegt om warmtewisselaars met direct contact te gebruiken voor het verwarmen van proceswater of waswater als voldoende grote restwarmte capaciteit beschikbaar is. De technologie is beschikbaar en kan als “volwassen” worden beschouwd.
- Restwarmte bij rookgassen welke beschikken over oliedampen en een hoog vochtgehalte, zoals rookgassen van friteuses, bevinden zich op een procestemperatuur van 180 ° C en vereisen voorbehandeling om de oliedampen te verwijderen alvorens er kan overgegaan worden naar een warmteterugwinning. Er is geen eenvoudige methode beschikbaar om de restwarmte terug te winnen vanwege de lagere temperatuur en de aanwezigheid van condenserende oliedampen die zelfs na het gebruik van filters grote hoeveelheden, maar niet alle, oliedampen uit de gassen verwijderen. Het koelen van deze gassen tijdens een warmteterugwinningsproces, zoals in energieopwekkingssystemen bij lage temperatuur, zou kunnen resulteren in condensatie van de resterende oliedampen wat op zijn beurt zal resulteren in problemen met warmteoverdracht in conventionele warmtewisselaarapparatuur.
- Restwarmte uit waswater op een zeer lage temperatuur van 37 °C kan worden gebruikt voor het voorverwarmen van suppletiewater gedurende koudere maanden. De toepasbaarheid van deze optie is afhankelijk van de geografische locatie van de installatie.
- Vooruitstrevende bedrijven overwegen verschillende opties voor warmteterugwinningssystemen met lage temperatuur restwarmte. Er zijn echter beperkende problemen zoals de lage temperatuur van de warmtebron, de vereiste van een warmteafvoer met lage temperatuur in de vorm van water dat wordt gebruikt voor het condensorgedeelte van deze systemen.

## 6.7 Cement - Droog- en schachtovens

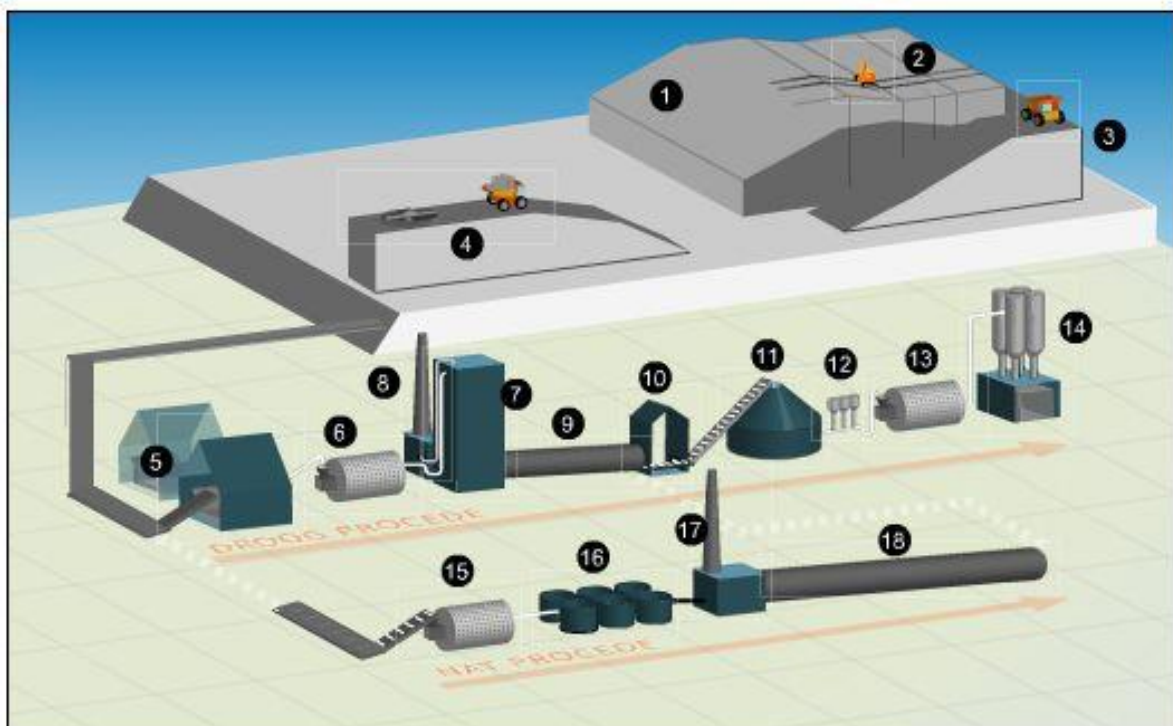
### 6.7.1 Cementproductie

Om cement te verkrijgen moeten vier hoofdbestanddelen homogeen vermengd worden in bepaalde verhoudingen: kalk (65 %), silicium (20 %), aluminiumoxide (10 %), en ijzeroxide (5 %). Omdat kalk of krijt de belangrijkste elementen zijn, vestigen cementfabrieken zich bij voorkeur in de buurt van grote kalk- of krijtgroeven. (Zie bijvoorbeeld de ENCI-fabriek te Maastricht)

Eenmaal samengevoegd worden deze elementen, die het ruwe materiaal vormen, in installaties verwerkt in een nat of droog procédé, afhankelijk van het watergehalte van de kalk of het krijt.

- In het natte procédé wordt het ruwe materiaal gemalen en met water vermengd tot men een vloeibare pasta verkrijgt die homogeen wordt vermengd en opgeslagen wordt in grote cilindrische vaten. Vervolgens wordt dit deeg boven in de oven ingebracht.
- Bij het droge procédé wordt het ruwe materiaal gedroogd en vermalen tot een homogeen poeder. Tenslotte wordt het in een voorverwarmingsoven gebracht, waar het na gedeeltelijke decarbonatatie in de oven gaat.

Het merendeel van de Belgische- en Nederlandse cementproductie is overgeschakeld naar het droge procédé dat aanzienlijk minder warmte verbruikt.



- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1. Steengroeve (kalk, klei)            | 10. Koelinstallatie             |
| 2. Peiler                              | 11. Opslag van klinker          |
| 3. Kipauto                             | 12. Toevoegingen                |
| 4. Vergruizen                          | 13. Vermaling van cement        |
| 5. Voorbereiding van de homogenisering | 14. Cement silo's, verzending   |
| 6. Vermaling                           | 15. Vermaling                   |
| 7. Filter                              | 16. Aanlengen en homogenisering |
| 8. Voorverhitting                      | 17. Filter                      |
| 9. Roterende oven                      | 18. Oven                        |

FIGUUR 28 - CEMENTPRODUCTIE (BRON: [HTTP://WWW.JOOSTDEVREE.NL](http://www.joostdevree.nl) )

Het fijngemalen en homogene poeder of deeg wordt in de oven geleidelijk tot een temperatuur van 1.450°C verhit. Tijdens deze operatie wordt warmte uitgewisseld tussen de warme verbrandingsgassen van verpulverde poederkool of andere brandstoffen en de grondstoffen die in tegengestelde richting van deze gassen stromen.

De sintering gebeurt steeds in de omgeving van de vuurhaard in de draaioven. Deze licht hellende en langzaam om zijn as draaiende metalen cilinder is van binnen bekleed met vuurvaste stenen. De klinker verlaat de oven onder de vorm van korrels op een temperatuur van ongeveer 1.200°C. De koeling gebeurt met lucht, die door warmte-uitwisseling opgewarmd wordt en ofwel naar de brander gestuurd wordt, ofwel gebruikt wordt voor het drogen van diverse materialen. De rookgassen verlaten de schoorsteen op een temperatuur van minder dan 200°C.

De tweede etappe, die zal leiden tot cement, is de vermaling. Tijdens deze etappe worden de verschillende bestanddelen gedoseerd, vermengd en zodanig vermalen dat men een homogeen en zeer fijn poeder verkrijgt: het cement. Klinker is het basisbestanddeel van Portlandcement. Het kan samen met andere industriële of natuurlijke grondstoffen worden vermalen zoals:

- Hoogovenslakken die latent hydraulisch zijn
- Vliegashoudende elektriciteitscentrales op steenkool, die puzzolane eigenschappen vertoont
- Fillers: vaak erg fijne grondstoffen, meestal op basis van kalk

In het mengsel worden verschillende vormen van calciumsulfaat (gips, anhydriet) gebruikt. Zij regelen de bindingstijd van het cement, wat zijn verwerking bevordert.

De installatie die traditioneel wordt gebruikt in deze tweede etappe is de kogelmolen. Momenteel worden nieuwe vermalingstechnieken, met name rolmolens of verticale maalmachines, ontwikkeld met het doel het elektriciteitsverbruik drastisch te verminderen.

### 6.7.2 Restwarmte bij cementproductie

Deze paragraaf behandelt typische bronnen van restwarmte die terugkomen in het droogproces van oude- en kleine schachtovens, als bij de grotere productie eenheden.

- De klinker-koellucht van het koelbed bezit een temperatuur dat varieert tussen de 180 °-480 °C. De koellucht wordt gebruikt om de verbrandingslucht voor brandstof gestookte stoomketels voor te verwarmen en voor andere hulpverwarming.
- De rookgassen afkomstig van de calcineringsreactie en van de verbranding van brandstoffen die worden gebruikt in de oven bevatten hoge percentages aan CO<sub>2</sub>. De uitlaatgastemperatuur kan variëren van 150 °-260 ° C. In de meeste gevallen worden de rookgassen vermengd met klinker-koellucht en wordt de warmte teruggewonnen in boilers of andere warmteterugwinningseenheden.
- De oppervlaktetemperatuur van de oven en de precalciner kan variëren tussen 260°-430 °C. Er is nog geen praktische manier beschikbaar om deze warmte terug te winnen. De beste oplossing is om het isolatie-vuurvaste mantel opnieuw te ontwerpen om de ovenschaaltemperatuur te verlagen.

## 6.8 Coatings - Vinyl Coating fabriek

Deze paragraaf behandelt typische restwarmtebronnen voor middelgrote coatinginstallaties die vloeren en andere producten produceren.

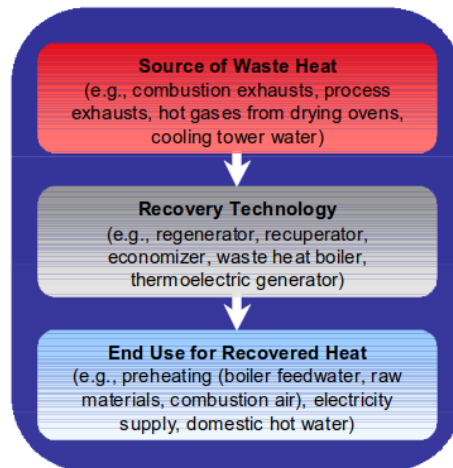
- Ovens worden gebruikt om vinyl of andere gecoate materialen te verwarmen en te harden. De ovens hebben verschillende zones, elke zone met zijn eigen brander(s), recirculerende ventilatoren en afvoerleidingen. De kanalen van verschillende zones worden gecombineerd tot één enkel gemeenschappelijk kanaal dat is verbonden met thermische oxidatiemiddelen. Tijdens het verhittingsproces worden vluchtige organische stoffen (VOS) gegenereerd die vermengd raken. De materialen worden verwarmd tot een procestemperatuur van 150 °-200 °C en worden vervolgens afgekoeld voordat ze afgevoerd worden.

Uit veiligheidsoverwegingen is het noodzakelijk om een minimale hoeveelheid lucht in de oven borgen waarbij een minimum LEL-waarde van 25% wordt beoogd. De ovens gebruiken infrarode (IR) zones als aanvullende warmtebron. Deze rookgassen worden verbrand om alle luchtverontreinigingen te verwijderen, vandaar dat ze niet als een directe warmtebron worden beschouwd.

- Drogers worden gebruikt om inkt te drogen. De drogers kunnen recirculerende luchtstroom gebruiken die wordt verwarmd door luchtverwarmers. Een bepaalde hoeveelheid uitlaatlucht wordt afgevoerd. De luchtstroom is nodig om een goede luchtvochtigheid te handhaven die een efficiënt droogproces mogelijk maakt waarbij een bepaalde hoeveelheid lucht wordt afgevoerd. De afvoerlucht heeft een temperatuur van 150 ° C en hoger en bevat "schone" warmte die een groot percentage (meer dan 50%) van de totale warmte-invoer naar de droger vertegenwoordigt.
- Regeneratieve thermische oxidatiemiddelen (=RTO) worden gebruikt om VOC's op te vangen die in de ovens worden gegenereerd. De RTO's zijn ontworpen om warmte terug te winnen uit het verbrandings(kamer)gedeelte van het systeem waardoor de inkomende uitlaatlucht uit de ovens worden voorverwarmd. De RTO's voeren schone uitlaatlucht af bij een temperatuur van ongeveer 180 °-200 °C. Ze lijken zeer efficiënt in het terugwinnen van warmte uit de rookgassen. Het is noodzakelijk om de RTO's te laten werken bij een temperatuur hoger dan 816 ° C om te voldoen aan de lokale luchtemissievoorschriften. De restwarmte wordt afgevoerd bij ongeveer 180 °-200 °C en kan worden gebruikt om warmte aan de ovens te leveren of om warm water te leveren.
- De stoomketels worden gebruikt voor de stoomtoevoer naar de processen en voor de verwarming van bedrijfsruimten waar dit nodig is. De stoomketels hebben rookgassen van ongeveer 500 ° F 260 ° C en ze hebben geen enkele vorm van warmteterugwinning voor de rookgassen. De stoom wordt over vrij lange afstanden verdeeld via een netwerk van stoomleidingen en het condensaat keert terug naar het ketelhuis. Restwarmtebronnen zijn rookgassen bij 260 ° C en spuiwater van de ketel bij de bedrijfsdruk. De warmte kan worden gewonnen met behulp van in de handel verkrijgbare warmteterugwinningssystemen.
- Sommige ovens gebruiken een heet olie-recirculatiesysteem om hete lucht naar de ovens te voeren. De olieverwarming maakt gebruik van met aardgas gestookte branders om hete gassen te produceren die worden gebruikt voor het verwarmen van recirculerende olie. Dit apparaat voert rookgassen af bij een relatief lage procestemperatuur van 180 ° C of lager. De restwarmte in de rookgassen kan worden teruggewonnen met behulp van in de handel verkrijgbare apparatuur.
- Ruimteverwarming kan een belangrijk deel van het energieverbruik in deze sector vertegenwoordigen. De ruimteverwarming gebeurt meestal met behulp van stoom geproduceerd in de hierboven genoemde ketels. Er is geen afvalwarmte in verband met dit verwarmingssysteem.

## 7 Restwarmte-uitkoppelingstechnologieën

In dit hoofdstuk worden enkele restwarmte-uitkoppelingstechnologieën besproken alsook kritische factoren in de economische haalbaarheid van een restwarmteproject. Om de verschillende technologieën praktisch te toetsten, zijn in dit hoofdstuk een aantal gerealiseerde praktijkcases opgenomen waarbij de voor- en nadelen kort worden aangehaald.



FIGUUR 5 - RESTWARMTE UITKOPPELING  
PRINCIPE COMPONENTEN

Om restwarmte terug te winnen zijn drie essentiële componenten vereist:

1. Een toegankelijke bron van restwarmte;
2. Een terugwinningstechnologie en;
3. Een gebruiker voor de teruggewonnen energie.

De teksten hieronder steunen voor een groot deel op deze bronnen:

[Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry](#), U.S. Department of Energy, 2008)

[Waste Heat Recovery](#), Bureau of Energy Efficiency, India

### 7.1 Voordelen van restwarmte valorisatie

De mogelijke voordelen van restwarmte valorisatie kunnen geclassificeerd worden in diverse categorieën: (Waste Heat Recovery, 2007)

- *Verhoging van de proces-efficiëntie:* Interne valorisatie van restwarmte kan een direct effect hebben op de efficiëntie van het proces. Dit wordt weerspiegeld door een vermindering van het energieverbruik en zal daardoor leiden tot een directe vermindering van de energiekosten; de algemene proceskosten.
- *Reductie van emissies:* De recuperatie van warmte zorgt integraal voor een vermindering van schadelijke emissies op de installatie waar de restwarmte als nuttige warmte wordt ingevoerd.
- *Reductie van technische installaties:* restwarmtevalorisatie kan leiden tot het verkleinen of uitsparen van installatiecomponenten zoals schouwen, rookgasventilatoren, koelers, kanalen, ketels, enz.

- *Reductie van hulpenergieverbruik:* zoals vermindering van het energieverbruik van apparatuur, zoals elektriciteit voor ventilatoren, pompen enz.

(Bron: *Industrial Waste Heat Recovery, 2004*)

## 7.2 Afwegingen in het economiseren van een restwarmte-uitkoppeling

Het vraagstuk of een restwarmte-uitkoppeling economisch interessant is dient steeds case per case te worden bekomen. Er zijn hiervoor namelijk te veel beïnvloedende factoren op het zakelijk resultaat. Te beginnen bij de kenmerken van de restwarmtebron en de omgeving waarin deze zich bevindt om de restwarmte uit te koppelen.

De economische rechtvaardiging van warmteterugwinningssystemen hangt af van:

- Temperatuur en kwaliteit of netheid van de reststromen;
- Omvang & beschikbaarheid van restwarmte;
- Kosten-batenverhouding van het systeem;
- De vermeden (brandstof) energiekosten bij de warmtevragers;
- De technische en economische kenmerken van de potentiële restwarmtegebruikers;
- Het aantrekken van eventuele subsidiegelden voor het realiseren van het restwarmteproject.

Een groot aantal technologieën en systemen zijn beschikbaar om warmte terug te winnen uit schone (rook)gassen met een hoge (650 ° C) of een gemiddelde (rook)gastemperatuur (316-650 ° C) van schone rookgassen die worden afgevoerd uit industriële processen. In de meeste gevallen vormt een (rook)gas temperatuur > 870 ° C een temperatuur bovengrens die een beperking oplevert naar het aantal beschikbare uitkoppelingstechnologieën.

Er zijn verschillende systemen beschikbaar om warmte terug te winnen van schone gassen en vloeistoffen bij lagere temperatuur. Relatief lage energieprijzen of andere interne investeringsprioriteiten voorkomen echter dat ze op grote schaal worden gebruikt.

Eenzijds is er bijvoorbeeld een grote hoeveelheid restwarmte beschikbaar in processen met hoge temperaturen echter bevatten de restwarmtestromen veel verontreinigingen die het gebruik van bestaande restwarmteterugwinningssystemen ernstig beperken.

Anderzijds verhinderen thermodynamische beperkingen en het gebrek aan economisch verantwoorde, efficiënte energieconversiesystemen grootschalig gebruik van warmteterugwinning uit reststromen met lage temperatuur.

In veel gevallen kunnen de beschikbare technologieën en hardware economisch grote hoeveelheden warmte terugwinnen in de vorm van hete lucht (gas), vloeistof (water) of stoom maar wordt er binnen de entiteiten weinig gebruik gemaakt van dergelijke energiebronnen.

Specifiek voor lage-temperatuur restwarmtestromen vormen de kosten, beperkingen van de systeemgrootte en het gebrek aan een nuttige toepassing van de laagwaardige warmte binnen de entiteit de belangrijke barrières voor warmteterugwinning vanuit restwarmtestromen.

Soms legt ook de lage temperatuur van een restwarmtestroom een ernstige beperking op de warmteoverdrachtssnelheid en resulteert in omvangrijke installaties.



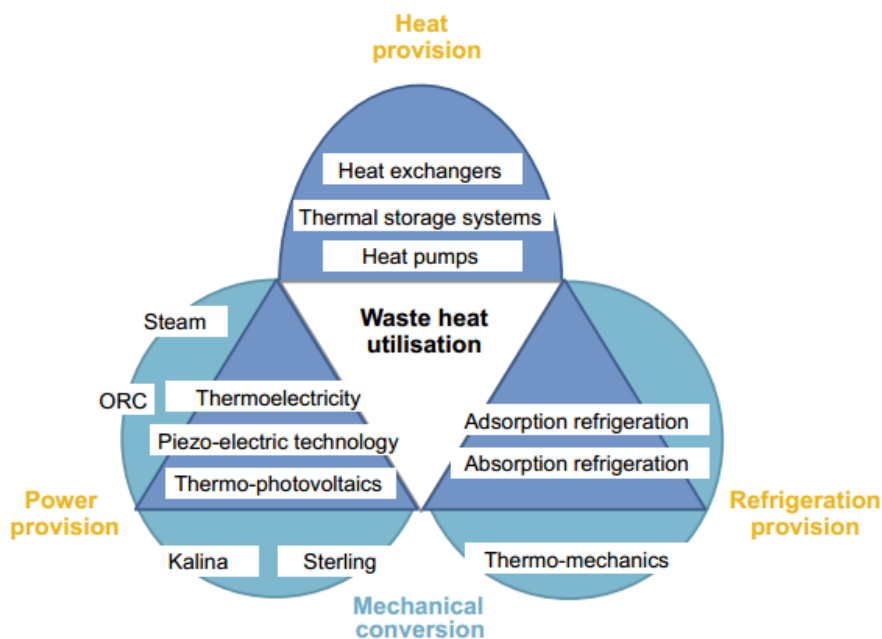
De beoordeling van de economische haalbaarheid van een restwarmteproject hangt naast bovenstaande aspecten ook nauw samen met andere factoren, waaronder de risico-inschaling van zo'n project. Vragen die een restwarmtebedrijf zich hierbij kan stellen zijn:

- Het realiseren van het restwarmteproject kan enkel gebeuren tijdens een shut down van het industrieel proces op geplande onderhoudsmomenten om productieverlies te vermijden. Zeker binnen petrochemische context is dit een issue.
- De exploitatie van het restwarmteproject mag geen operationeel risico meebrengen voor de goede werking van het industrieel proces.
- De uitwerking van een restwarmteproject kent voor een industrieel bedrijf een opportuiniteitskost doordat schaarse hoogopgeleide medewerkers op dat moment niet voor andere core business projecten ingezet kunnen worden.
- Vaak zijn industriële processen niet ontworpen om nadien nog een restwarmtekoppeling te kunnen installeren. Binnen een petrochemische context gebeurt het frequent dat een restwarmteproject als onhaalbaar wordt ingeschaald wegens te weinig plaats op of nabij de installaties.
- Bij het onderzoeken van een restwarmteproject moet oog gegeven worden aan cascade-effecten die zo'n koppeling te weeg kan brengen. Het integreren van een extra warmtewisselaar in een schoorsteen kan bijvoorbeeld tot gevolg hebben dat de oorspronkelijk trekventilator onvoldoende capaciteit bezit waardoor bijkomende investeringen moeten gebeuren.
- Het gebeurt dat industriebedrijven vaak uitsluitend willen samenwerken met gekende partners van hun installaties. Als energiemakelaar is het niet altijd duidelijk welke competentie, invloed en standpunten deze dienstverleners er op nahouden over restwarmtekoppelingen.
- Een grote focus op het zoeken en integreren van een geschikte restwarmtebronnen mag de aandacht niet doen verslappen over het leggen van een geschikte koppeling met de warmtevragers.

### 7.3 Overzicht van uitkoppelingstechnieken voor restwarmte

Restwarmte kan worden gebruikt om warmte te verschaffen voor thermische processen of om stroom of koeling te genereren. Een andere valorisatiemogelijkheid is de omzetting naar elektriciteit via ORC-applicaties.

Voor het leveren van stroom en koeling zijn twee mogelijkheden aanwezig: restwarmte wordt direct omgezet of mechanische energie wordt eerst gegenereerd via een tussenstap, die vervolgens een elektrische generator of een koelmachine aandrijft. In onderstaande **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** worden een aantal restwarmteuitkoppelingstechnologieën weergegeven, gecategoriseerd per hoofdgroep.



FIGUUR 29 - RESTWARMTE UITKOPPELINGSTECHNOLOGIEËN

### *Restwarmte voor warmteterugwinning (= heat provision)*

Warmteterugwinning of -verplaatsing is de meest efficiënte en tegelijkertijd de eenvoudigste technologische benadering van het gebruik van restwarmte. Restwarmte wordt bijvoorbeeld via een warmtewisselaar uit een uitlaatgasstroom gehaald en naar een ander medium overgebracht. Het warmteoverdrachtsmedium kan heet water, thermische olie, stoom of een gasvormig fluïdum zijn.

De overgedragen warmte wordt via een warmteoverdrachtsmedium naar de beschikbare warmtevragers getransporteerd, waar het verder wordt gebruikt.

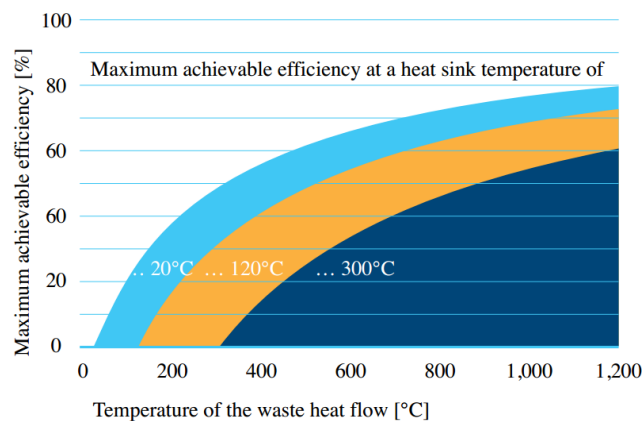
Het warmteoverdrachtsmedium dat mogelijk is en de parameters (druk, temperatuur, etc.) die vereist zijn, zijn afhankelijk van de beschikbare restwarmtebronnen. Zo kan restwarmte worden teruggewonnen en worden gebruikt om proceswarmte te genereren in de vorm van stoom of thermische olie, die in de plaats komt van energiegebruik. Een extra toepassingsgebied kan het leveren van verwarmingsenergie op een lagere temperatuur.

Warmtewisselaars worden op veel manieren in de industrie gebruikt. Voor veel warmtewisselaars wordt een heet- en koud medium gelijktijdig langs een gemeenschappelijk warmtetransmissievlak gevoerd. De warmtestroom die door deze warmteoverdrachtsoppervlakken wordt overgedragen, varieert met de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de warmtewisselaar, de afmeting van het warmtetransmissieoppervlak en het gemiddelde temperatuurverschil tussen de twee media. Op basis van ontwerp en werkingsmodus worden er onderscheid gemaakt tussen verschillende ontwerpen van warmtewisselaars (warmtewisselaars met pijpenbundels, platenwarmtewisselaars, dubbelpijp warmtewisselaars, rotatiewarmtewisselaars,...). Verbrandingsluchtvoorverwarmers zijn een speciaal type warmtewisselaar. Ze zijn geïmplementeerd voor het gebruik van restwarmte in verbrandingsrookgassen om de aangevoerde verbrandingslucht voor te verwarmen aangezien de rookgassen vaak verontreinigingen bevatten.

### Restwarmte voor elektriciteitsproductie (= power provision)

De omzetting van restwarmte in elektriciteit gebeurt in principe in overeenstemming met het hierboven geïntroduceerde concept van warmteterugwinning. Het thermodynamisch maximaal haalbare rendement van energieopwekking voor een gesloten cyclusproces hangt af van het temperatuurniveau van de restwarmtebronnen en de temperatuur van het koellichaam. Dit wordt beschreven aan de hand van het Carnot-rendement, zoals te zien is in Figuur . Bij een koellichaamtemperatuur van bijvoorbeeld 20 °C, kan uit een restwarmtestroom van 70 ° C theoretisch ongeveer 15% van de energie worden omgezet in mechanische energie en vervolgens in elektriciteit. Als de temperatuur van de restwarmtestroom 520 ° C bedraagt, bij een gelijke koellichaamtemperatuur van 20 °C, neemt dit aandeel toe tot ongeveer 63%.

Het Carnot-rendement toont aan dat de theoretische efficiëntie voor stroomopwekking relatief minimaal is, zeker bij lage brontemperaturen kunnen enkel lage rendementen worden bekomen.



FIGUUR 30 - CARNOT-RENDEMENT

Stoomprocessen, organische Rankine cyclusprocessen, Kalina processen worden beschouwd als essentiële processen voor de omzetting van restwarmte naar elektriciteit met een mechanische tussenfase. Het specifieke gebruik van deze processen hangt af van verschillende factoren, waaronder met name het temperatuurniveau van de restwarmtebron. (Process heat in industry and commerce)

### Restwarmte voor koelvoorziening (= refrigeration provision)

De koeling of de airconditioning van gebouwen of processen kan ook met restwarmte worden gerealiseerd. Hiertoe wordt restwarmte gebruikt om warmte, op lage temperatuur, naar een warmteoverdrachtsmedium over te brengen. De lage temperatuurwarmte kan vervolgens worden gebruikt in een absorptiekoelmachine om koud water te genereren. In de absorptiekoelmachines wordt koud water gegenereerd door absorptie- of adsorptieprocessen dat beschikbaar is voor andere nuttige doeleinden. Conventionele koeling via compressiekoelenheden en hun vermogensvereiste kunnen bijgevolg vervangen worden door deze absorptiekoelmachines op restwarmte. Als er bijvoorbeeld geen warmtebehoefte is in het bedrijf of als de bestaande warmtebehoefte niet praktisch kan worden ingevuld door restwarmte, kan naast het leveren van warmte ook koeling met behulp van restwarmte worden overwogen.

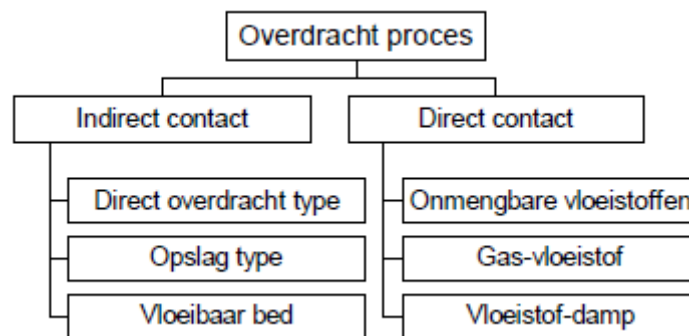
## 7.4 Uitkoppelingstechnieken voor warmteterugwinning

Warmtewisselaars in de context van restwarmteterugwinning, worden veelal gebruikt om warmte terug te winnen uit diverse rookgassen naar verbrandingslucht die terug een ketel, turbine of oven binnenkomt. De voorverwarmde verbrandingslucht zal de oven bij een hogere temperatuur binnenkomen waardoor er minder energie door de brandstof moet worden toegevoerd om de verbrandingslucht op temperatuur te brengen. Typische technologieën die worden gebruikt voor luchtvoorverwarming zijn:

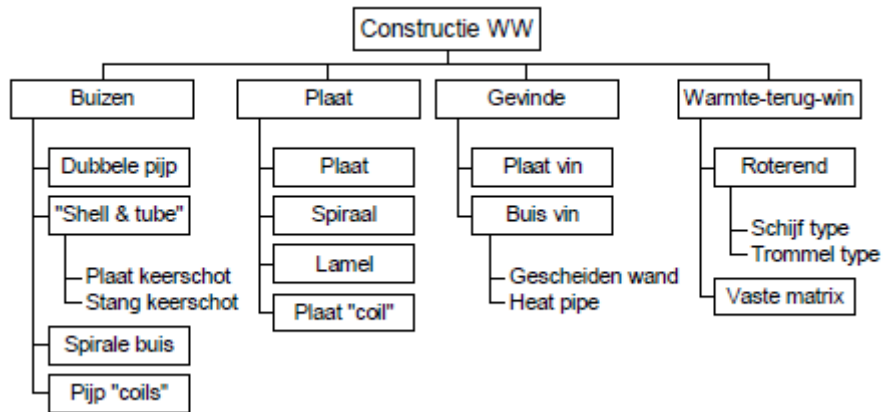
- Recuperatoren,
- Ovenregenerators,
- Branderregenerators,
- Roterende regeneratoren en
- Passieve luchtvoorverwarmers,
- Platenwarmtewisselaars,
- Restwarmteboilers, ...

In essentie gaat de uitkoppeling en valorisatie van restwarmte gepaard met de inzet van warmtewisselaar. Deze kunnen op verschillende wijzen worden ingedeeld naargelang:

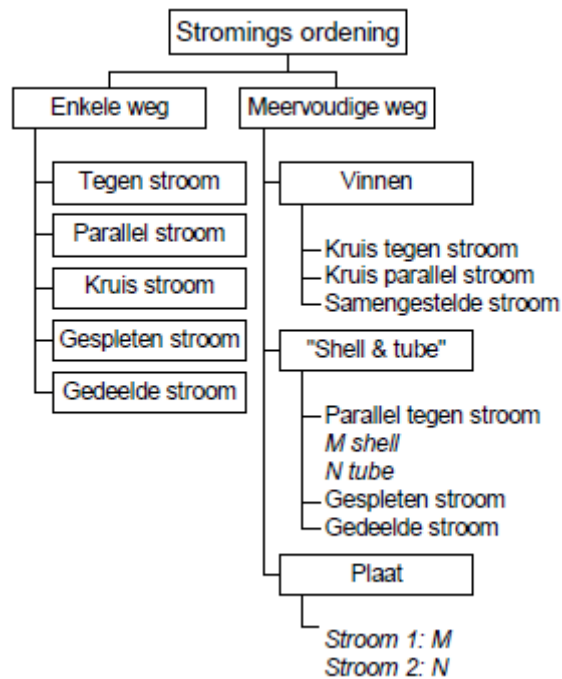
- Overdrachtsproces,
- Aantal stromen,
- Compactheid oppervlak<sup>1</sup>,
- Constructie,
- Stroom rangschikking/ordening,
- Overdracht mechanisme,
- Procesfunctie.



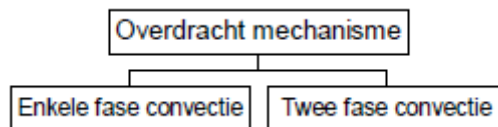
FIGUUR 31 - CLASSIFICATIE WARMTEWISSELAARS NAAR OVERDRACHTSPROCES



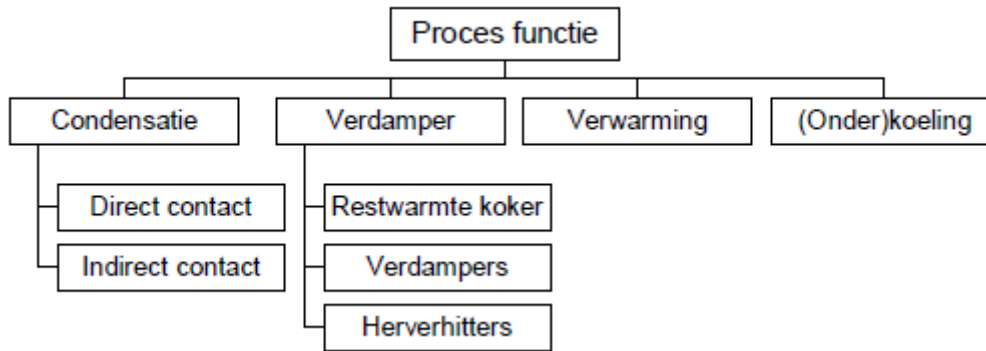
FIGUUR 32 - CLASSIFICATIE WARMTEWISSELAARS NAAR CONSTRUCTIE WARMTEWISSELAAR



FIGUUR 33 - CLASSIFICATIE WARMTEWISSELAARS NAAR STROMINGSORDENING



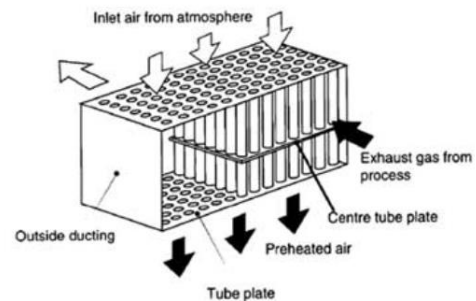
FIGUUR 34 - CLASSIFICATIE WARMTEWISSELAARS NAAR OVERDRACHTSMECHANISME



FIGUUR 35 - CLASSIFICATIE WARMTEWISSELAARS NAAR PROCESFUNCTIE

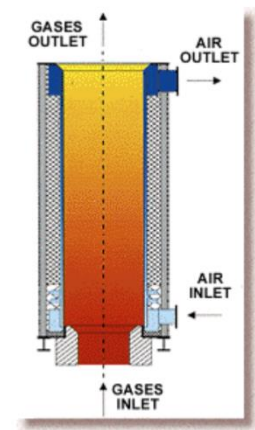
### 7.4.1 Warmterecuperatoren

In een recuperator vindt warmte-uitwisseling plaats tussen de rookgassen en de verbrandingslucht die door metalen of keramische wanden van de recuperator stroomt, waarbij de verbrandingslucht wordt voorverwarmd met de rookgassen.



FIGUUR 36 - WARMTERECUPERATOR

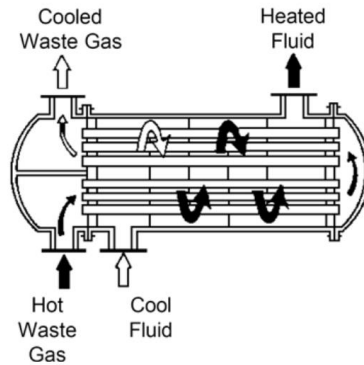
De eenvoudigste configuratie van een warmterecuperator, is de metalen stralingsrecuperator, die uit twee concentrische metalen buizen bestaat. De binnenste buis draagt de hete rookgassen terwijl de externe ring de verbrandingslucht vanuit de atmosfeer naar de luchtinlaten van de ovenbranders draagt. De hete rookgassen worden gekoeld door de inkomende verbrandingslucht die de teruggewonnen warmte-energie naar de verbrandingskamer voert. Dit is energie die als gevolg daarvan niet door de brandstof hoeft te worden toegevoerd, minder brandstof hoeft verbrand te worden voor een gegeven ovenbelasting.



FIGUUR 37 - STRALINGSRECUPERATOR

De stralingsrecuperator dankt zijn naam aan het feit dat een aanzienlijk deel van de warmteoverdracht van de hete gassen naar het oppervlak van de binnenste buis plaatsvindt door stralingswarmteoverdracht. De koude lucht in de eenjarige planten is echter bijna transparant voor infraroodstraling, zodat alleen convectiewarmteoverdracht plaatsvindt naar de binnenkomende lucht.

Een ander bekend type van warmtewisselaar is de buizenwarmtewisselaar (ofwel Shell & Tube warmtewisselaar). Deze warmtewisselaar is van het convectieve type.



Figuur 38 - CONVECTIEVE RECUPERATOR

Zoals te zien is in bovenstaande figuur worden de hete gassen door een aantal parallelle buizen met een kleine diameter gevoerd, terwijl de te verwarmen binnenkomende lucht de buizen omringt en één of meerdere keren over de hete buizen beweegt, in een richting loodrecht op hun assen.

Als de wisselaar zo is geconstrueerd dat het gas twee keer door de wisselaar dient te passeren, dan wordt de warmtewisselaar een recuperator met twee doorgangen genoemd. Hoewel zowel de kosten van de wisselaar als de drukval toenemen, verhoogt het de effectiviteit van warmte-uitwisseling bij zo'n wisselaar met 2 doorgangen. Shell & tube wisselaars zijn over het algemeen compacter en hebben een hogere effectiviteit dan stralingsrecuperatoren vanwege het grotere warmteoverdrachtsgebied dat mogelijk wordt gemaakt door het gebruik van meerdere buizen en meerdere gangenpassen.

Er bestaan ook combinaties tussen een stralings- en convectierecuperator waarbij het koude verbrandingsgas eerst een stralingskamer passeert om vervolgens door een convectiekamer te worden geleid.

Recuperatoren zijn zowel in een metalen uitvoering als in een keramische uitvoering terug te vinden. Metalen recuperatoren hebben een temperatuursbeperking tot 1100 °C. Om deze temperatuursbeperkingen te overwinnen, werden de keramische recuperatoren ontwikkeld welke kunnen gebruikt worden tot een temperatuur van 1500°C.

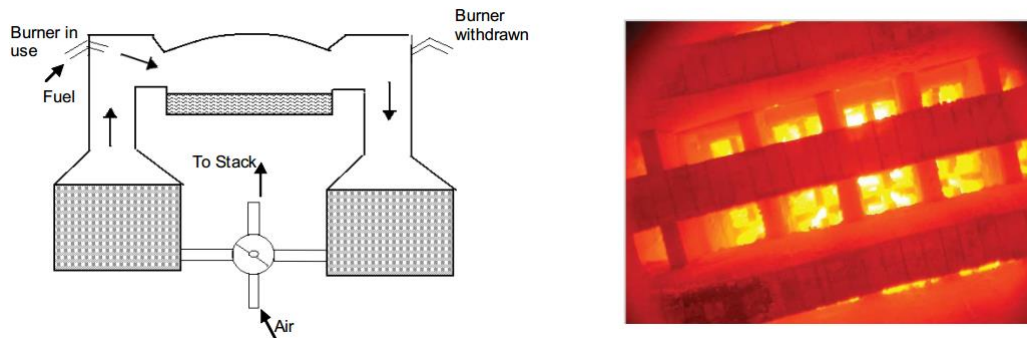
## 7.4.2 Regeneratieve ovens

Regeneratieve ovens bestaan uit twee bakstenen kamers waar warme (rookgassen) en koude (koude verbrandingslucht) luchtstromen afwisselend doorlopen. Terwijl de rookgassen door één kamer gaan, absorberen de stenen warmte uit de rookgassen en stijgen ze in temperatuur. Een regeneratieve oven geniet de voorkeur wanneer de recuperatiecapaciteit groot dient te zijn en wordt op grote schaal gebruikt bij glas- en staalsmeltovens.

De luchtstroom wordt vervolgens zodanig aangepast dat de inkomende verbrandingslucht door het hete maaswerk loopt, dat op zijn beurt warmte overdraagt naar de inkomende verbrandingslucht.

Twee kamers worden gebruikt, zodat terwijl de ene warmte van de rookgassen absorbeert, de andere warmte overdraagt naar de verbrandingslucht. De richting van de luchtstroom verandert ongeveer elke 20 minuten.

Regeneratorsystemen zijn speciaal geschikt voor toepassingen met hoge temperaturen met sterk gecontamineerde rookgassen. Een groot nadeel is de grote omvang en kapitaalkosten, die aanzienlijk hoger zijn dan de kosten van recuperatoren.



FIGUUR 39-REGENERATIEVE OVEN

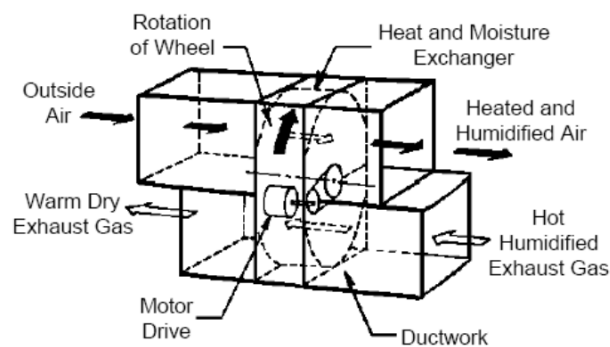
Er bestaan belangrijke verbanden tussen de grootte van de regenerator, de tijd tussen omkeringen, dikte, geleidbaarheid en de warmteopslagverhouding van de baksteen.

In een regenerator is de tijd tussen de omkeringen een belangrijk aspect. Lange perioden betekenen een hogere thermische opslag en dus hogere kosten. Ook resulteren lange perioden van omkeer in een lagere gemiddelde temperatuur van voorverwarmen.

Ophoping van stof en slakvorming op de oppervlakken verminderen de efficiëntie van de warmteoverdracht als de oven oud wordt. Warmteverliezen tussen de buitenwand van de regenerator en omgevingslucht zullen de totale warmteoverdracht verminderen.

### 7.4.3 Warmtewiel

Een warmtewiel werkt op dezelfde manier als een vaste regenerator. De warmteoverdracht wordt vergemakkelijkt door warmte op te slaan in een poreus medium, waarbij dit medium afwisselend wordt doorstroomt door warme en koude gassen.



FIGUUR 40 - WARMTEWIEL CONCEPT

Warmtewielen gebruiken een roterende poreuze schijf die over twee parallelle kanalen wordt geplaatst, één kanaal vervoert de hete rookgassen en het andere kanaal vervoert het koude inlaatgas. Het wiel is samengesteld uit materiaal met een hoge warmtecapaciteit en roteert tussen de twee kanalen. Hierbij wordt warmte overgedragen van het hete gaskanaal naar het koude gaskanaal. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** t oont een dwarsdoorsnede van een warmtewiel.

Warmtewielen zijn over het algemeen beperkt tot toepassingen met lage en middelmatige temperaturen vanwege de thermische materiaalbelasting op het warmtewiel die wordt veroorzaakt door hoge temperaturen. Grote temperatuurverschillen tussen de twee kanalen kunnen leiden tot differentiële uitzetting en grote vervormingen, waardoor de integriteit van luchtafdichtingen in gevaar komt.





Figuur 41 - voorbeeld warmtewiel (bron: BOVEMA)

In sommige gevallen kunnen keramische wielen worden gebruikt voor toepassingen met hogere temperaturen. Een uitdaging/ beperking voor de toepassing van warmtewielen is het voorkomen van contaminatie tussen de twee gasstromen, omdat verontreinigingen kunnen worden getransporteerd in het poreuze materiaal van het wiel.

Een bijkomend voordeel van het toepassen van een warmtewiel is dat het wiel ook vocht kan recupereren uit de warme luchtstroom. Indien ontworpen met hygroscopische materialen, kan vocht van het ene naar het andere kanaal worden overgebracht. Warmtewielen kunnen veelal worden teruggevonden bij luchtbehandelingssystemen & air conditioning installaties.

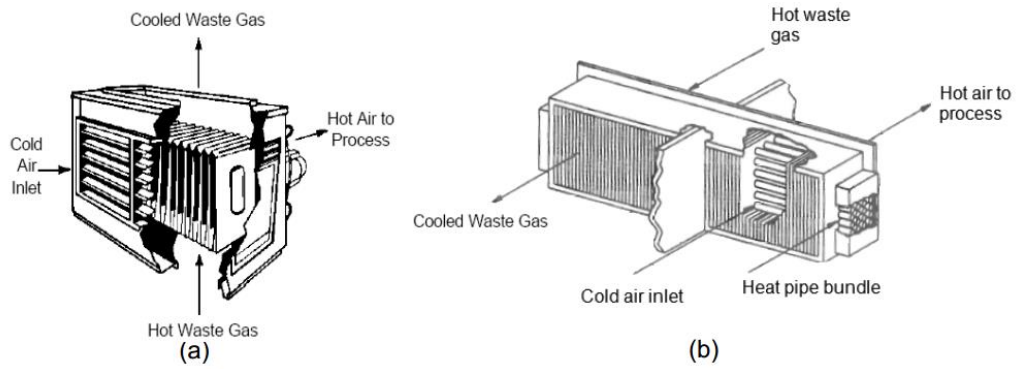
#### 7.4.4 Passieve luchtvoorverwarmers

Passieve luchtvoorverwarmers zijn gas-gas warmteterugwinningsapparaten voor toepassingen met lage tot gemiddelde temperaturen waarbij contaminatie tussen de beide gasstromen moet worden voorkomen. Toepassingsvoorbeelden zijn ovens, stoomketels, gasturbine-uitlaat,... Passieve luchtvoorverwarmers zijn in twee uitvoeringsvormen beschikbaar als plaatuitvoering en als warmtebuis uitvoering.

De plaatwarmtewisselaar, zoals getoond in Figuur 42a, bestaat uit meerdere parallelle platen die afzonderlijke kanalen creëren voor de warme- en koude gasstromen. De gasstromen wisselen af tussen de platen en creëren zo aanzienlijke gebieden voor warmteoverdracht. Deze systemen zijn minder gevoelig voor vervuiling in vergelijking met warmtewielen, maar ze zijn vaak omvangrijker en duurder.

De warmtebuiswisselaar, zoals getoond in Figuur 42b, bestaat uit meerdere leidingen met afgedichte uiteinden. Elke pijp bevat een capillaire structuur die verplaatsing van het werkfluidum tussen de hete en koude uiteinden van de buis vergemakkelijkt. De hete gassen passeren over één uiteinde van de warmtepijp, waardoor het werkfluidum in de pijp verdampen.

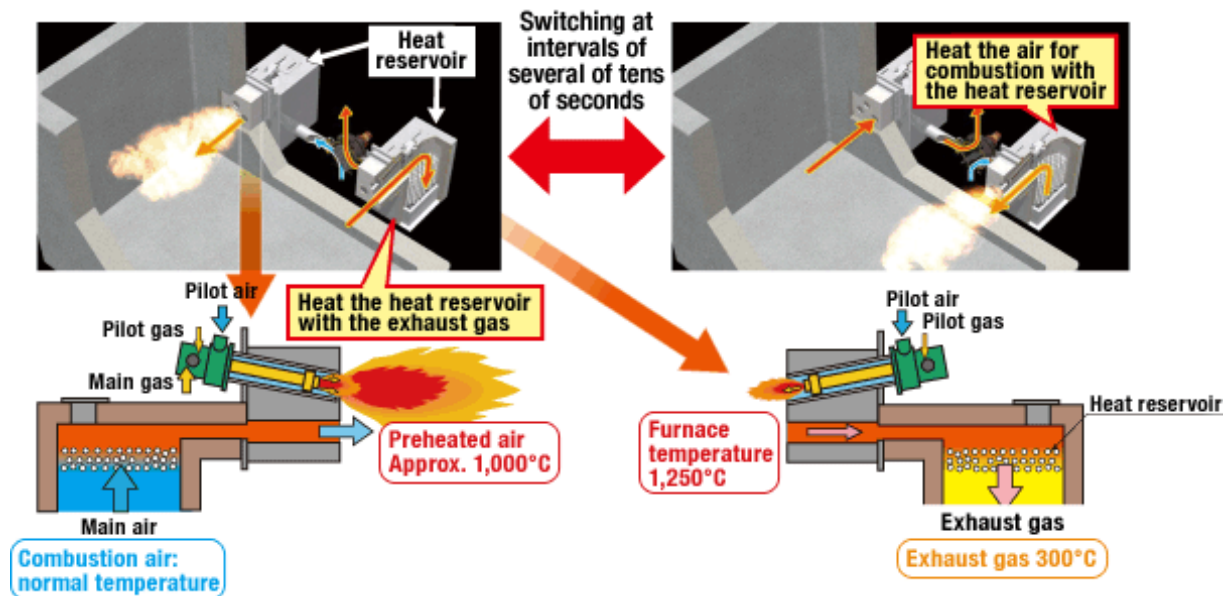
Drukgradiënten langs de pijp zorgen ervoor dat de hete damp naar het andere uiteinde van de buis beweegt, waar de damp condenseert en warmte naar het koude gas overbrengt. Het condensaat stroomt vervolgens terug naar de warme kant van de buis via capillaire werking.



FIGUUR 42: PASSIEVE LUCHTVOORVERWARMERS

### 7.4.5 Regeneratieve / recuperatieve branders

Een regeneratieve brander is een systeem dat extreem hoog-efficiënte terugwinning van warmte uit rookgassen in de industriële ovens mogelijk maakt. Vanwege het grote reductie-effect in brandstofefficiëntie, is dit systeem specifiek geadopteerd en gepopulariseerd in ovens met een relatief hoge temperatuur zoals verwarmingsovens voor walsen, smeedovens, warmtebehandelingsovens, smeltovens, bakovens.



FIGUUR 43 - PRINCIPE VAN EEN REGENERATIEVE BRANDER

Recuperatieve branders omvatten een warmtewisselaar die een geheel met de brander is en die de inkomende verbrandingslucht voorverwarmt. De uitlaatgassen worden "teruggetrokken" door de brander door een eductor die zich stroomopwaarts van de brander bevindt. Deze ontwerpstelling leidt tot een hoge luchtvoorverwarmingstemperatuur en uitstekende thermische efficiëntie.

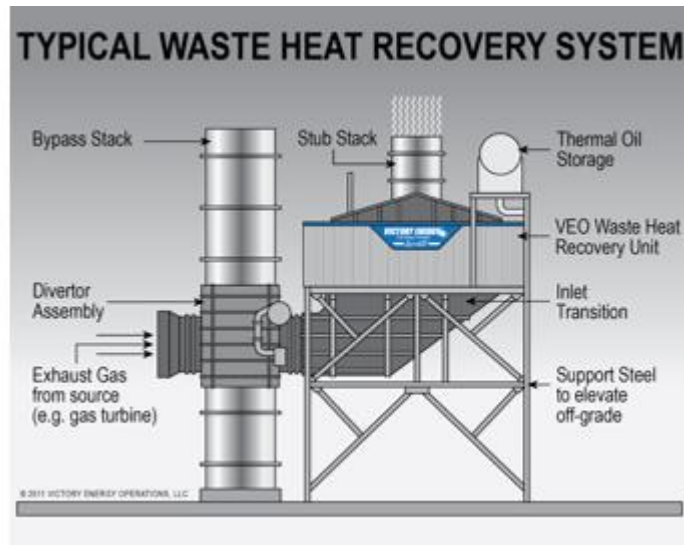
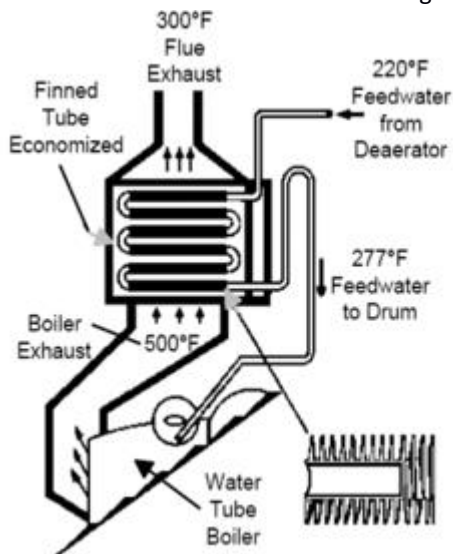


FIGUUR 44 - PRINCIPE VAN RECUPERATIEVE BRANDERS

### 7.4.6 Economizers

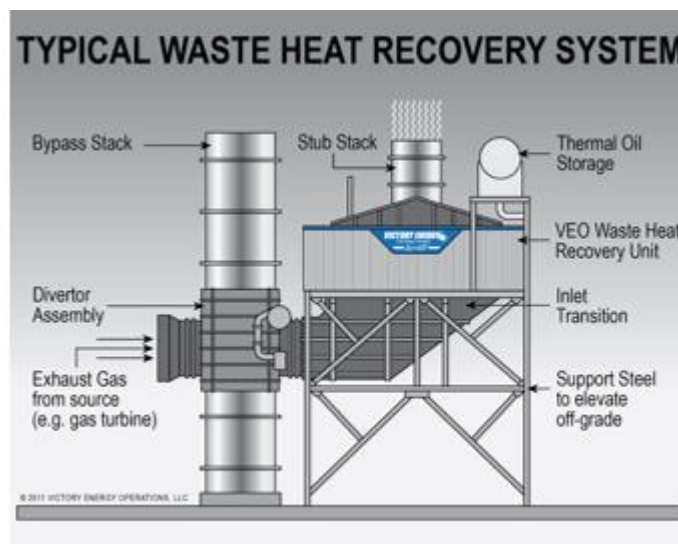
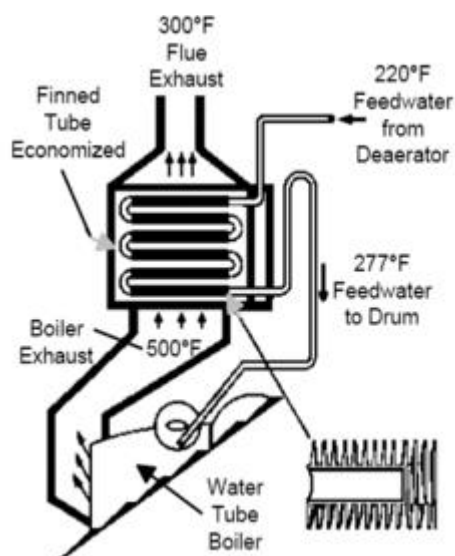
Economizers worden gebruikt om warmte terug te winnen uit rookgassen van een lage tot een gemiddelde temperatuur (+/- 200°C) waarbij de teruggewonnen warmte wordt gebruikt om vloeistoffen te verwarmen. Toepassingen zijn onder meer ketelvoedingswater voorverwarming, hete procesvloeistoffen, warm water voor ruimteverwarming,...

Een economizer bestaat uit een ronde buis met aangehechte vinnen die het oppervlak en de warmteoverdrachtsnelheden maximaliseren. De vloeistof stroomt door de buizen en ontvangt warmte van hete gassen die langs de buizen stromen.



FIGUUR 45 - ECONOMIZERS

illustreert een van ribben voorziene warmtewisselaar waarbij rookgassen van de ketel worden gebruikt voor het voorverwarmen van voedingswater.



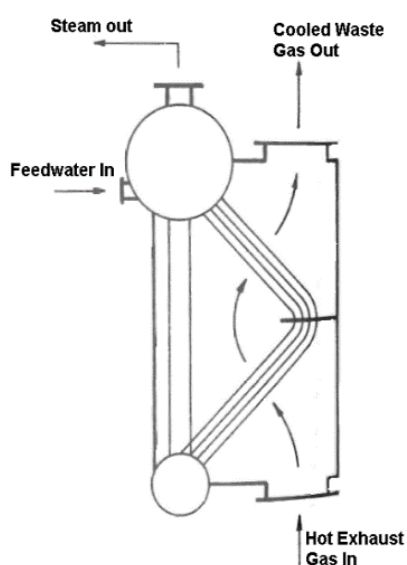
FIGUUR 45 - ECONOMIZERS

Economizers zijn beschikbaar in verschillende uitvoeringsvormen, materialen e.d. Ook zijn Economizers beschikbaar die de rookgassen kunnen koelen tot een temperatuur van 65-71°C waarbij ze resistent zijn tegen het zure condensaat dat zich vormt.

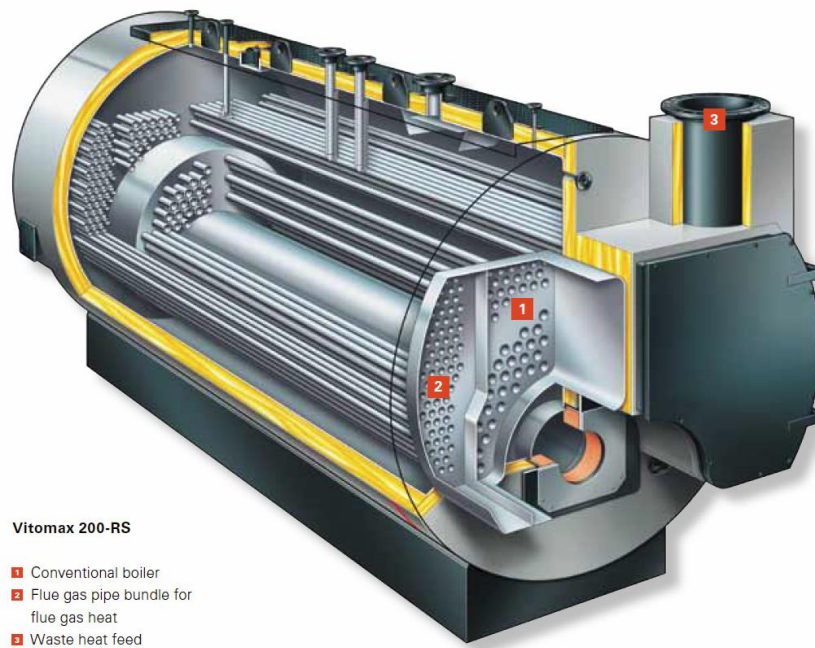
#### 7.4.7 Restwarmteboilers (Waste heat Steam boilers)

Restwarmteboilers zijn waterpijpketels die rookgassen gebruiken van gemiddeld tot hoge temperatuur om stoom te genereren. Restwarmteboilers zijn verkrijgbaar in verschillende capaciteiten, waardoor gasinvoer mogelijk is van 25 tot 30.000 m<sup>3</sup>/min.

In gevallen waarbij de restwarmte niet voldoende is voor het produceren van gewenste stoom(druk)niveaus, kan een hulpbrander of een naverbrander worden toegevoegd om een hogere stoomoutput te bekomen. De stoom kan worden gebruikt als procesverwarming of voor energieopwekking. Om oververhitte stoom te produceren vereist het systeem de toevoeging van een externe oververhitter.



Figuur 46 - Restwarmteboiler (principe)



Figuur 47 - restwarmtestoomketel (bron: VISSMANN)

### 7.4.8 Lading voorverwarmen

Het voorverwarmen van een productlading verwijst naar alle inspanningen waarbij restwarmte wordt gebruikt om de lading voor te verwarmen die het systeem binnenkomt.

Het meest gebruikelijke voorbeeld is voorverwarming van het ketelvoedingswater, waarbij een economizer warmte van hete verbrandingsrookgassen overdraagt naar het water dat de ketel binnentreedt. Andere toepassingen maken gebruik van directe warmteoverdracht tussen de rookgassen en de vaste materialen die de oven binnenkomen.

In een stapelsmelter worden blokken en schroot geladen via de ovenmond en voorverwarmd door rookgassen die de oven verlaten waarbij het energieverbruik kan worden verminderd tot ongeveer 47% ten opzichte van conventionele ovens.

Hoewel het voorverwarmen van het ketelvoedingswater een standaardpraktijk is, wordt voorverwarming van het materiaal voorafgaand aan het smelten niet zo veel gebruikt.

Dit is te wijten aan een verscheidenheid aan factoren, waaronder problemen bij het beheersen van de productkwaliteit, problemen in verband met emissies van het milieu en de toegenomen complexiteit en kosten van het bouwen van geavanceerde systemen voor het laden van ovens / warmteterugwinning.

Niettemin heeft warmteterugwinning via voorverwarming van de lading de afgelopen tien jaar meer aandacht gekregen.

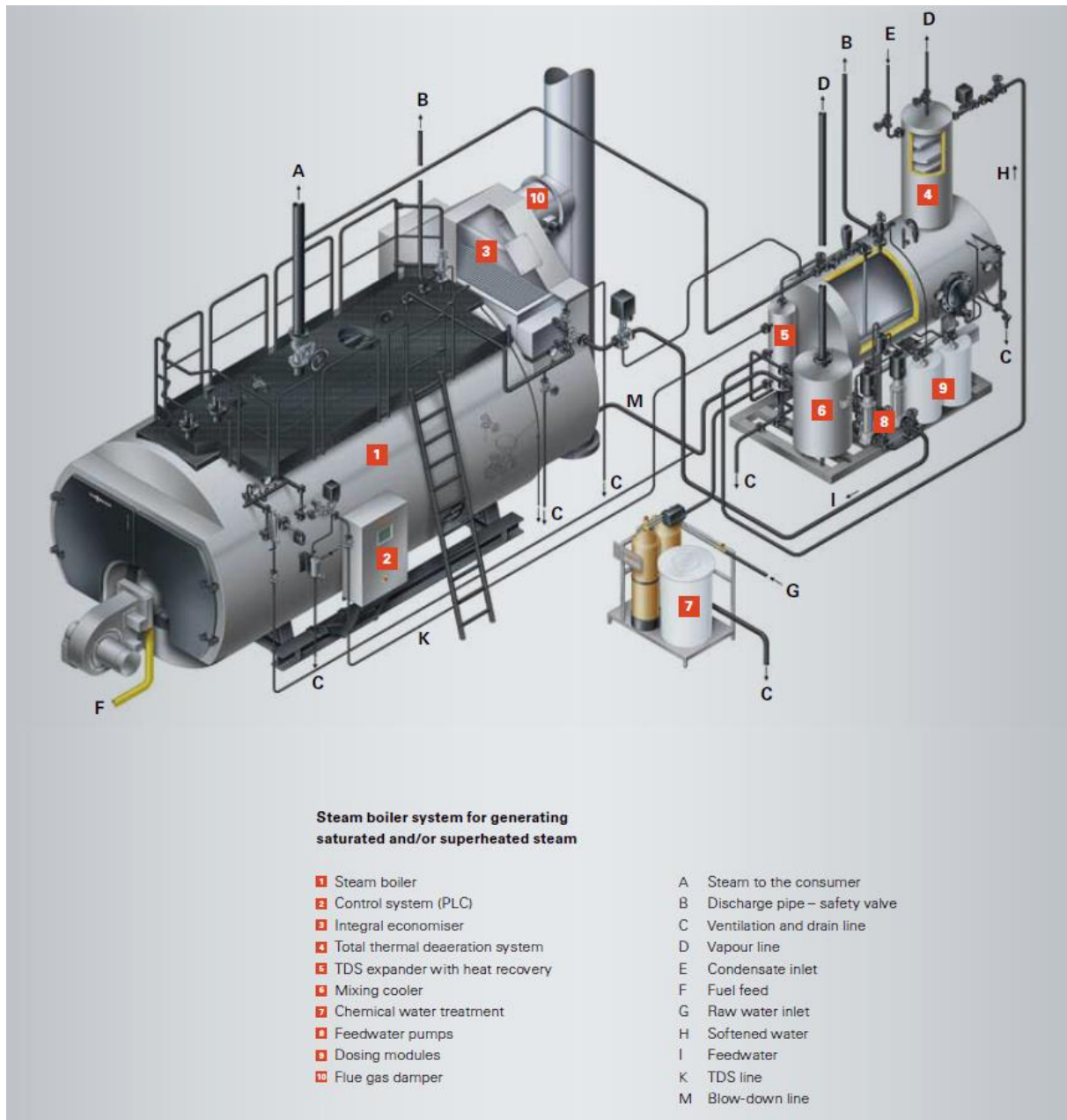
*([Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry](#), U.S. Department of Energy, 2008)*

*([Waste Heat Recovery](#), Bureau of Energy Efficiency)*

## 7.4.9 Energierecuperatie uit stoomnetwerken

### 7.4.9.1 Condensaatwinning

Stoom is binnen de industrie een belangrijke hoogwaardige energiedrager. Als de stoom doorheen een industrieel proces afkoelt, ontstaat verzadigde of natte stoom. Deze stoom condenseert in de warmtewisselaars. Door condenspotten wordt de stoom gescheiden van de condens. Het condensaat heeft nog steeds een hoge energie-inhoud. Door het condensaat te hergebruiken of warmte terug te winnen uit het condensaat (en nuttig in te zetten veelal in de stoominstallatie) is energiebesparing mogelijk.



Figuur 48 - Stoomketel layout (bron: Viessmann)

Condensaat bevat van nature een grote hoeveelheid inwendige energie waarbij verschillende methodes beschikbaar zijn om de restwarmte uit het geproduceerde condensaat te winnen.

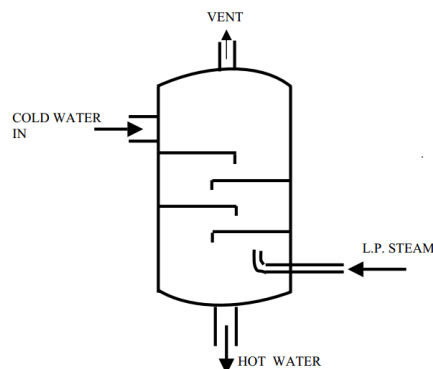
De terugwinning van warmte uit condensaat kan men indelen in 2 groepen, namelijk indirecte warmteterugwinning terugwinning en directe warmteterugwinning.

Na toepassing van de stoom in het productieproces is het ontstane condensaat niet altijd in het stoomproces te hergebruiken. Bijvoorbeeld vanwege aanwezige verontreinigingen. Het condensaat heeft nog wel een hoge energie-inhoud. Uit het condensaat is met een warmtewisselaar de warmte terug te winnen voordat het water wordt geloosd. De warmte is aan te wenden voor een ander bedrijfsproces maar meestal is het ter voorverwarming van het verse koude suppletiewater voor de stoomketel. Het verse behandelde koude suppletiewater gaat eerst door de warmtewisselaar voordat het naar de voedingswatertank gaat.

Bij de indirecte contactcondensaat terugwinning worden gassen afgekoeld tussen de 38-43 °C. In dit bereik zal de aanwezige waterdamp in de gassen bijna volledig condenseren. Indirecte contactwisselaars zijn verkrijgbaar in verschillende bouwvormen waarbij ze beschikbaar zijn in roestvrij staal, glas, teflon of andere geavanceerde materialen naargelang de proceskenmerken.

Bij een directe contactcondensatiwinning zijn de procesrookgassen (kan ook stoom zijn) en de koelvloeistof in direct contact met elkaar en vermengen ze zich. Aangezien deze systemen geen scheidingswand omvatten waarover warmte moet worden overgedragen, heeft deze technologie geen nood aan een warmteoverdrachtsoppervlakte.

Een voorbeeldsysteem wordt getoond in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Wanneer de rookgassen (i.c. lagedruk stoom) de warmtewisselaar binnenkomen, worden ze gekoeld door koud water dat aan de bovenkant van de eenheid wordt ingevoerd. De verwarmde waterstroom verlaat de bodem van de wisselaar en geeft warmte aan een extern systeem. Een uitdaging met directe contactcondensatie is dat het water kan worden gecontamineerd door stoffen die zich in de rookgassen bevinden.



**FIGUUR 49-DIRECTE CONTACT CONDENAAT TERUGWINNING**

[\(Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, U.S. Department of Energy, 2008\)](#)  
[\(Waste Heat Recovery, Bureau of Energy Efficiency\)](#)

#### 7.4.9.2 Hergebruik van naverdampingsstoom

Flash stoom wordt gevormd bij ontspannen van condensaat op een hoge druk. Eenmaal op een lagere druk vaporiseert een gedeelte van dit condensaat weer en vormt flash stoom.

Flash stoom bevat niet alleen een gedeelte van de massa en daarmee ook een gedeelte van het gezuiverde water dat best gerecupereerd wordt. De flash stoom bevat eveneens een groot deel van de beschikbare energie die nog in het condensaat aanwezig is.

Recuperatie van flash stoom is dus voordelig om de nodige hoeveelheid vers water te verminderen, maar het is vooral voordelig op energetisch vlak.

Het recupereren van flash stoom leidt tot veel grotere energiebesparingen dan enkel het opvangen van het vloeibare condensaat. Vooral bij grotere drukken bevat de flash het grotere deel van de energie.

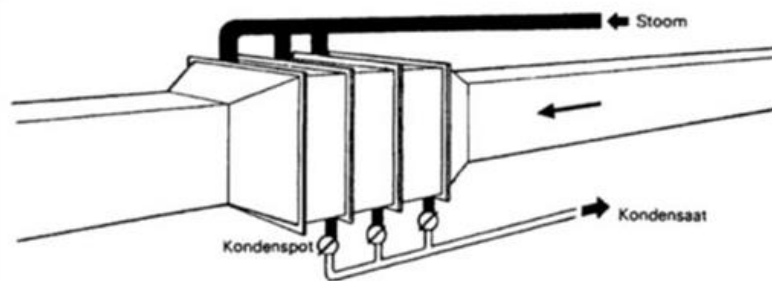
Flash stoom neemt wel een veel groter volume in dan condensaat. De retourleidingen moeten dit volume dan ook aankunnen. Dit moet kunnen gebeuren zonder drukverhoging in de retourleidingen. Dit kan anders de goede werking van condenspotten en installaties stroomopwaarts belemmeren.

In het ketelhuis kan deze flash stoom, net als het condensaat zelf, gebruikt worden voor verwarming van het verse ketelwater in de ontgasser. Andere mogelijkheden zijn het gebruik van de stoom voor luchtverwarming.

Buiten het ketelhuis kan de flash stoom eveneens gebruikt worden voor verwarming van onderdelen onder de 100°C. In de praktijk zijn geregeld stoomgebruikers actief op een druk van 1 bara. In deze leidingen kan de flash stoom dus geïnjecteerd worden.

Bijvoorbeeld bij serieschakeling van verwarmingsbatterijen voor lucht, kan de flash stoom gebruikt worden voor voorverwarming van de lucht.

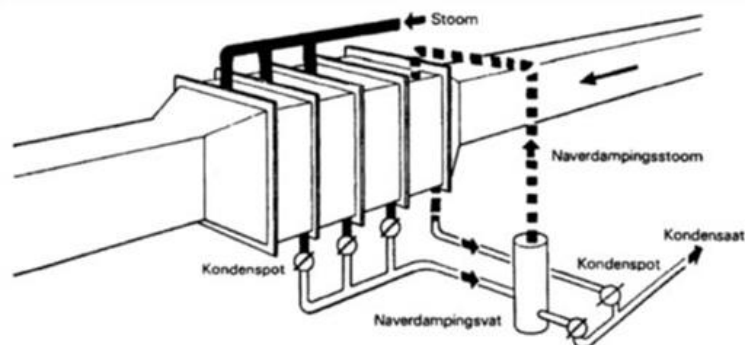
In het initiële geval is zijn er verwarmingsbatterijen aaneengeschakeld voor een luchtverwarming, zoals getoond wordt in de volgende figuur.



Figuur 50 - verwarmingsbatterij luchtgroep zonder Flashstoomrecuperatie

Door de drukval over de condenspotten ontstaat er naverdampingsstoom in de retourleidingen voor de condens. Als deze leidingen op 1 bara staan, is de temperatuur hiervan 100°C. Dit is vaak voldoende als voorverwarming. Daardoor kan één batterij worden afgekoppeld van de stoomleiding en gevoed worden door de flash stoom. Of kan een extra voorverwarmingsbatterij worden voorgekoppeld die gebruikt maakt van de flash stoom.

(bron: BBT VITO – energie uit stoom)



Figuur 51 - VERWARMINGSBATTERIJ LUCHTGROEP met FLASHSTOOMRECUPERATIE

Door de drukval over de condenspotten ontstaat er naverdampingsstoom in de retourleidingen voor de condens. Als deze leidingen op 1 bara staan, is de temperatuur hiervan 100°C. Dit is vaak voldoende als voorverwarming. Daardoor kan één batterij worden afgekoppeld van de stoomleiding en gevoed worden door



de flash stoom. Of kan een extra voorverwarmingsbatterij worden voorgekoppeld die gebruikt maakt van de flash stoom.

#### 7.4.10 Warmtepomp

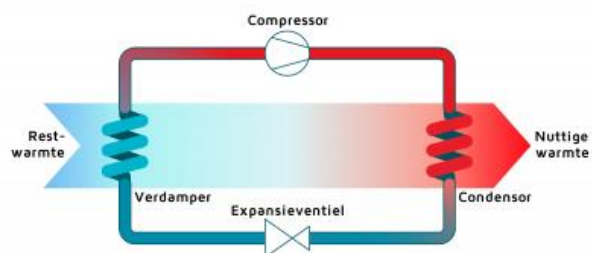
Bijna alle warmtewisselingsstechnologieën omvatten een stroom van energie die van een hoge temperatuur naar een lagere temperatuur wordt omgezet. Volgens de hoofdwetten van de thermodynamica kan energie herhaaldelijk worden overgedragen of getransformeerd maar wordt het steeds minder geschikt voor gebruik (= laagwaardig) doordat steeds een deeltje van de energie "weglekt" naar de omgeving uit het systeem.

Uiteindelijk zal de energie zo'n lage temperatuur bevatten dat het helemaal niet meer beschikbaar is om een nuttige functie uit te voeren. Dit kan beperkingen stellen aan een warmteterugwinning wanneer de temperatuur van de beschikbare restwarmte lager is dan de temperatuur die nodig is voor een gegeven verwarmingsvraag. (Afwalwarmte kan bijvoorbeeld beschikbaar zijn in de vorm van heet water bij 32 ° C, terwijl elders in de installatie warm water bij 82 ° C nodig is.

Naarmate energieprijzen en koolstofprijzen stijgen, kan zelfs laagwaardige restwarmte economisch worden gebruikt andere toepassingen bij lage temperaturen. Het is mogelijk om de richting van de spontane energiestroom om te keren door het gebruik van een thermodynamisch systeem dat bekend staat als een warmtepomp. In dergelijke gevallen kan een warmtepomp mogelijkheden bieden voor het "upgraden" van de warmte tot de gewenste temperatuur voor de eindgebruiker.

Het warmtepompprincipe wordt geschetst in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Warmtepompen gebruiken een externe hulpenergiebron (elektriciteit in geval van de elektrische compressiewarmtepomp) om een cyclus aan te drijven die energie van een lage temperatuurbron (zoals bv. Lage temperatuur restwarmte) absorbeert en deze bij een hogere temperatuur afgeeft. Afhankelijk van het ontwerp kunnen warmtepompen twee functies vervullen: ofwel het opwerken van restwarmte tot een hogere temperatuur, ofwel het gebruik van restwarmte als energie-input voor het aandrijven van een absorptiekoelsysteem (zie verderop).

Het opwaarderen van warmte kan in sommige gevallen economisch interessant zijn. Het temperatuurverschil tussen warmtebron en warmtevrager is hierin belangrijk. Als een warmtevrager een warmtebehoefte heeft bij een iets hogere temperatuur dan de restwarmtebron, kan de warmte soms efficiënter door een warmtepomp worden geleverd dan wanneer deze afkomstig was van het verbranden van extra fossiele brandstoffen.



FIGUUR 52-PRINCIPESCHETS WARMTEPOMP

Bron: [http://industrialheatpumps.nl/nl/f\\_a\\_q/](http://industrialheatpumps.nl/nl/f_a_q/)

Een belangrijke overweging bij het bepalen van de haalbaarheid van warmtepompen is de restwarmtetemperatuur en de gewenste "temperatuurlift". Het type cyclus en het type werkstof dat wordt aangewend is afhankelijk van de temperaturen waarbij de warmtepomp warmte kan ontvangen of afgeven. Ook zal dit de maximaal haalbare temperatuurlift bepalen.

Het rendement van een warmtepomp neemt af naarmate de gewenste temperatuurstijging toeneemt. Uitkoppelingstechnieken voor elektriciteitsproductie

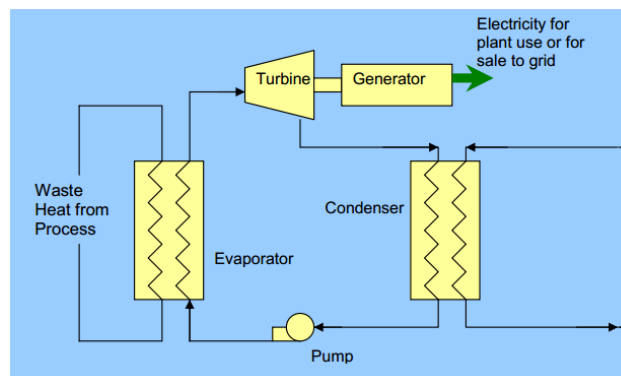
Een andere manier van warmteterugwinning is het produceren van elektriciteit vanuit restwarmte die beschikbaar is. Het produceren van elektriciteit omvat principieel het gebruik van restwarmte om mechanische energie te creëren die vervolgens een elektrische generator aandrijft. Hoewel de klassieke Carnot- & Rankine cycli goed ontwikkeld zijn, worden er nieuwe technologieën ontwikkeld die elektriciteit rechtstreeks uit warmte kunnen opwekken, zoals thermo-elektrische en piezo-elektrische generatie. Zoals eerder aangehaald is de efficiëntie van elektriciteitsproductie sterk afhankelijk van de temperatuur van de restwarmtebron.

#### 7.4.10.1 Traditionele stoomprocessen

Traditioneel wordt voor het produceren van elektriciteit de restwarmte gebruikt om stoom te produceren, die vervolgens een stoomturbine aandrijft. Een principeschema van een traditionele restwarmteterugwinning met een Rankine-cyclus wordt getoond in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

De traditionele stoom Rankine-cyclus is de meest efficiënte optie voor terugwinning van restwarmte uit uitlaatstromen met temperaturen boven de 340-370 °C. Bij lagere restwarmte temperaturen wordt de stoomcyclus minder kosteneffectief. Bovendien levert de lage temperatuurrestwarmte mogelijk niet voldoende energie om de stoom te oververhitten, wat noodzakelijk is voor het voorkomen van stoomcondensatie en erosie van de turbinebladen.

Organische Rankine-cyclus of de Kalina-cyclus zijn beter geschikt om toe te passen bij lage temperatuur restwarmte. De gebruikte vloeistoffen hebben daar een lagere kookpunttemperatuur in vergelijking met stoom. Daardoor kunnen dus lagere restwarmtetemperaturen ingezet worden om de cyclus aan de te drijven.



FIGUUR 53-TRADITIONELE STROOMPRODUCTIE MET STOOM

#### 7.4.10.2 Organic Rankine cyclusprocessen

De Organische Rankine Cyclus (ORC) werkt op dezelfde manier als de stoom Rankine-cyclus, maar gebruikt een organische vloeistof in plaats van stoom bv. siliconenolie, isopentaan, isobutaan,... waarbij hun kookpunt lager is en ze over een hogere dampspanning dan water beschikken. Hierdoor kan de Rankine-cyclus werken met aanzienlijk lagere restwarmte temperaturen van soms zo laag als 66°C.

Het temperatuurbereik voor ORC's zal afhangen van het gebruikte fluïdum, aangezien de thermodynamische eigenschappen van fluïda de efficiëntie van de cyclus bij verschillende temperaturen zullen beïnvloeden. In vergelijking met waterdamp hebben de vloeistoffen die in ORC's worden gebruikt een hogere molecuulmassa, wat compacte ontwerpen, een hogere massastroom en hogere turbinerendementen mogelijk maakt. Aangezien de cyclus echter bij lagere temperaturen functioneert, zal de totale efficiëntie grootorde 10-20%

zijn, afhankelijk van de temperatuur van de condensor en verdamper. Lage temperatuurcyclussen zijn van nature minder efficiënt dan temperatuurcyclussen bij hoge temperaturen. De maximale efficiëntiegrenzen kunnen worden uitgedrukt volgens het Carnot rendement (de maximaal mogelijke efficiëntie voor een warmtemotor die werkt tussen twee temperaturen).

Het Carnot rendement met een warmtebron van 150°C en een uitgaande temperatuur bij 25°C is slechts 30%. In vergelijking met dit rendement is het rendement van de ORC's een aanzienlijk percentage van de theoretische efficiëntie. Vooral in vergelijking met andere lage temperatuuropties, zoals piëzo-elektrische generatie, die slechts 1% efficiënt zijn.

Hoewel de economische aspecten van ORC-warmteterugwinning zorgvuldig moeten worden geanalyseerd, is het een bijzonder nuttige optie in industrieën waarbij er, binnen hun eigen site of bij naburige planten, geen nood is aan extra (proces)warmte die economisch gebruik kan maken van beschikbare restwarmte.

#### 7.4.10.3 Kalina cyclus

De Kalina cyclus is een variatie op de Rankine cyclus, waarbij een binair mengsel van ammoniak en water als werkvloeistof wordt gebruikt. Een belangrijk verschil is het temperatuurprofiel tijdens het koken en condensereren. Voor cyclussen met een enkelvoudige vloeistof (bijvoorbeeld stoom of organische Rankine) blijft de temperatuur constant tijdens het koken. Wanneer warmte wordt overgedragen naar de vloeistof) neemt de watertemperatuur langzaam toe tot de kooktemperatuur, waarbij de temperatuur gelijk blijft aan de kooktemperatuur totdat alle vloeistof is verdampt.

Bij een binair mengsel van water en ammoniak (die elk een verschillend kookpunt hebben) zal de temperatuur tijdens verdamping verhogen. Dit maakt betere thermische aanpassing mogelijk met de restwarmtebron en met het koelmedium in de condensor. Bijgevolg bereiken deze systemen een aanzienlijk grotere energie-efficiëntie

#### 7.4.10.4 Thermo-elektrische generatie

Thermo-elektrische (TE) materialen zijn vaste stoffen gefabriceerd uit halfgeleidermateriaal die de directe opwekking van elektriciteit mogelijk maken wanneer ze worden blootgesteld aan een temperatuurverschil. Deze systemen zijn gebaseerd op een fenomeen wanneer twee verschillende halfgeleidermaterialen worden blootgesteld aan een warmtebron en een warmteafleider, een spanning gecreëerd tussen de twee halfgeleiders, zoals wordt getoond in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

Figuur 54 - Thermo-elektrisch principe

De thermo-elektrische technologie bestaat al lang maar heeft een beperkt gebruik gezien de lage efficiëntie en hoge kosten. De meeste TE-generatiesystemen die in gebruik zijn, hebben rendementen van 2 tot 5% en worden voornamelijk gebruikt voor het aandrijven van instrumenten op ruimtevaartuigen of op zeer afgelegen locaties. Recente ontwikkelingen in de nanotechnologie hebben geavanceerde TE-materialen mogelijk gemaakt die een conversie-efficiëntie van 15% of meer kunnen bereiken.

Voordat TE-materialen in een breed bereik van restwarmte toepassingen kunnen worden ingezet, zijn er vorderingen nodig in zowel TE-productietechnologie als in warmteoverdrachtssystemen.

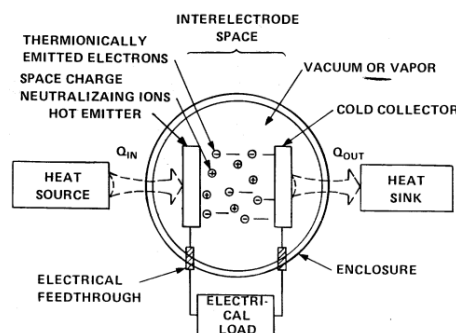
#### 7.4.10.5 Piëzo-elektrische generatie

Piëzo-elektrische generatie is een optie voor het omzetten van lage temperatuur restwarmte van 100-150 °C in elektrische energie. Piëzo-elektrische apparaten zetten mechanische energie om in de vorm van omgevingsvibraties tot elektrische energie. Een piëzo-elektrisch dunfilmmembraan kan voordeel halen uit oscillerende gasexpansie om een spanningsoutput te creëren. Studiewerk leert dat er nog verschillende technische uitdagingen zijn in verband met de technologie waarbij een lage efficiëntie (grootorde 1%) en een hoge installatiekost (ongeveer 10.000 €/W) de belangrijkste uitdagingen zijn.

Deze technologie is nog in volle ontwikkeling waarbij de toekomstige ontwikkelingen potentiële rendementen kunnen bereiken rond de 10%.

#### 7.4.10.6 Thermo-ionische generatie

Bij thermo-ionische generatie drijft een temperatuurverschil een elektronenstroom vanuit een metaal naar een metaaloxide-collector doorheen een vacuüm. Een belangrijk nadeel van deze systemen is dat ze beperkt zijn tot toepassingen met een hoge temperatuur (1.000 °C). Hoewel sommige ontwikkelingen temperaturen toelaten tussen de 100-300°C.



**FIGUUR 55-THERMO-IONISCHE GENERATIE**

(Bron: <http://propagation.ece.gatech.edu/ECE6390/project/Fall2010/Projects/group8/power.html>)

#### 7.4.10.7 Thermo-fotovoltaïsche generatie

Thermo-fotovoltaïsche generatoren kunnen worden gebruikt om stralingsenergie om te zetten in elektriciteit. Deze systemen omvatten een warmtebron, een emitter, een stralingsfilter en een PV-cel (zoals die worden gebruikt in zonnepanelen). Terwijl de emitter wordt verwarmd, zendt deze elektromagnetische straling uit. De PV-cel zet deze straling om in elektrische energie. De filter wordt gebruikt om straling door te geven op golflengten die overeenkomen met de PV-cel, terwijl de resterende energie terug naar de emitter wordt gereflecteerd. Deze systemen bieden perspectief op nieuwe methoden om restwarmterugwinning mogelijk te maken. Een klein aantal prototypes zijn gebouwd voor kleine brandertoepassingen en in een gasturbine voor helikopters.



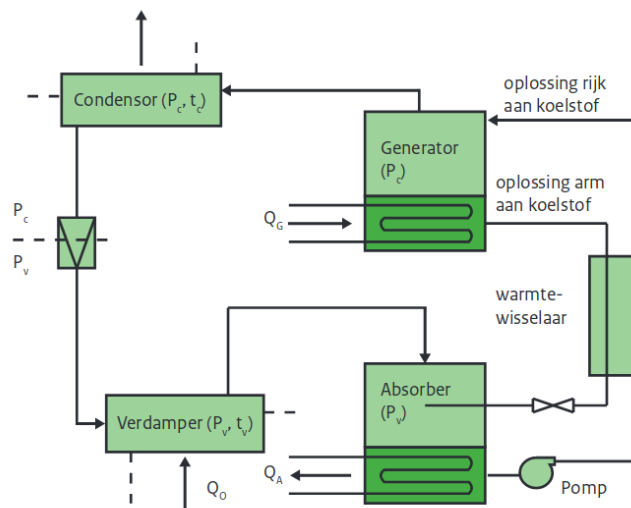
### 7.4.11 Absorptiekoelmachines met restwarmte

Absorptiekoelmachines kunnen gecategoriseerd worden in functie van hun gebruikte werkvloeistof, namelijk:

- Ammoniak-water;
- Lithiumbromide-water.

De Ammoniak-water absorptiekoelmachines worden gebruikt in diverse toepassingen zoals kleine koelkasten en grote warmteterugwinningssystemen bij elektriciteitscentrales. Ammoniak is een uitstekend koelmiddel met een hoge latente warmte en uitstekende warmteoverdracht eigenschappen. Vanwege de toxiciteit is het echter vaak beperkt tot toepassingen waarbij de apparatuur zich buiten bevindt, om de natuurlijke verdunning van eventuele lekken mogelijk te maken. Absorptiekoelmachines met ammoniak-water kunnen doorgaans toegepast worden tot  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Lithiumbromide-water wordt gebruikt voor verschillende systeemsoorten en wordt op grote schaal gebruikt om het meer toxische ammoniak te vermijden. Absorptiekoelmachines met een Lithium Bromide-water kunnen doorgaans toegepast worden tot  $-5^{\circ}\text{C}$ .



**FIGUUR 56- ABSORPTIEKOELMACHINE - PRINCIPESCHETS**

Het koelend effect ontstaat door verdamping in de verdamer van het meest vluchtige medium (bij water-LiBr is dat water, bij water-ammoniak is dat ammoniak).

In de verdamer wordt warmte onttrokken aan een externe stroom (bijv. koud water of een water-glycol mengsel). De damp wordt vervolgens geabsorbeerd in een oplossing met een hoge concentratie van de minst vluchtige component. Daarbij komt warmte vrij dat meestal wordt gekoeld met koelwater. De rijke absorptievloeistof wordt opgepompt naar de generator, naar een hoge druk.

Om de absorptievloeistof opnieuw te kunnen gebruiken, worden de geabsorbeerde dampen door een externe warmtebron verdampt in de generator. Deze externe warmtebron drijft de absorptiekoelmachine aan. Absorptiekoelmachines maken het mogelijk om restwarmte te gebruiken als externe warmtebron; aandrijving van het koelproces. Daarna worden de dampen gecondenseerd in de condensor op een hoge druk. De gecondenseerde dampen gaan via het expansieventiel op een lage druk naar de verdamer en het proces begint opnieuw.

*(Bron: Agentschap NL – absorptiekoelmachine)*

De efficiëntie van het koelsysteem of de koelmachines wordt aangegeven met de term "prestatiecoëfficiënt (COP)" en wordt gedefinieerd als het koelvermogen gedeeld door de vereiste warmte invoer. Voor een absorptiekoelmachine die geen gebruik maakt van restwarmte, ligt de COP in het bereik van 0,45-0,7. Een vergelijkbaar elektrisch bediend systeem zou een COP van 4,5 - 6,0 hebben.

Voor de absorptie-eenheden die restwarmte gebruiken, zijn de bedrijfskosten echter erg klein in vergelijking met de elektrische eenheden. De kosten (exploitatie en kapitaal of investering) moeten de kosten omvatten van de eenheid zoals geïnstalleerd op de locatie plus de kosten voor extra condensorapparatuur (koeltoren, koelwaterpompen en koelwaterleidingen). In de meeste gevallen zouden de kosten van het absorptiesysteem 50% hoger kunnen zijn dan het equivalente elektrische systeem. De kosten van het hulpsysteem bedragen ongeveer 33% van de totale kosten van het systeem. Om een absorptiekoeling te rentabiliseren kan het dus bijna niet anders dat de aangeboden (rest)warmtebron zeer goedkoop moet zijn in vergelijking tot de elektrische compressiekoelmachine.

## 7.5 Enkele praktijkvoorbeelden

### 7.5.1 Warmterecuperatie van een lokaal papierfabriek in Skjern, Denemarken

De Skjern Papierfabriek heeft geïnvesteerd in een grote warmtepomp om nuttig gebruik te maken van zijn lage temperatuur restwarmte vanuit het papier droogproces.

Bij het papierdroogproces werd een enorm energierugwinning potentieel ontdekt in de hete afzuiglucht. De hete afvoerlucht werd voordien uitgestoten naar de omgeving, maar door warmte te extraheren uit de energierijke lucht, wordt een enorm potentieel van warmte terugwinning beschikbaar.

In 2012 werden drie warmtepompen van 1,33 MW geïnstalleerd wat overeenkomt met een totale warmtepompcapaciteit van 4,0 MW. De restwarmte die aan het systeem wordt onttrokken, wordt verkocht aan een plaatselijk stadsverwarmingsbedrijf, Skjern Fjernvarme. De papierfabriek is eigenaar van de warmtepomp en het stadsverwarmingsbedrijf heeft een leidingnetwerk opgezet om de warmtepompfaciliteit met het stadsverwarmingsnetwerk te verbinden.

In 2016 bedroeg de jaarlijkse warmteproductie in Skjern Fjernvarme ongeveer 76.000 MWh en bedroeg de warmteafgifte van de fabriek ongeveer 39.000 MWh, wat overeenkomt met 52% van de totale stadsverwarmingsproductie in Skjern. De overige faciliteiten voor warmteproductie in Skjern Fjernvarme zijn biomassaketels, die in 2016 ongeveer 26 600 MWh produceerden, en aardgaseenheden die in 2016 ongeveer 10.000 MWh produceerden. De warmtepomp vervangt dus zowel aardgas als biomassa, wat overeenkomt met besparingen van meer dan 8000 ton CO<sub>2</sub> op jaarbasis.

Het stadsverwarmingswater wordt verwarmd van 37 tot 70 °C met de warmte die gerecupereerd wordt vanuit de afvoerlucht met een temperatuur tussen de 50 en de 58°C. De hoge luchttemperaturen maken directe warmtewisseling mogelijk, waardoor de afvoerluchttemperatuur daalt tot 43 °C. De afgekoelde afvoerlucht zal vervolgens dienst doen als lage temperatuur restwarmte bron voor de drie warmtepompen, waarbij de warmtepompen de overige warmte gebruiken. Het stadsverwarmingsnetwerk wordt rechtstreeks gekoppeld aan het warmtepompsysteem in de papierfabriek waar een opslagtank de levering vanuit de fabriek stabiliseert. De jaarlijkse COP is ongeveer 6,9, maar COP-factoren tussen 8 en 10 treden op in perioden van gedeeltelijke belasting

De prijs van warmte wordt maandelijks berekend op basis van de werkelijke productiekosten van de warmtepompinstallatie en de marginale kosten bij Skjern Fjernvarme. De overdrachtprijs wordt tussen deze twee prijzen geplaatst om billijkheid voor beide partijen te garanderen. De productiekosten bij het papierfabriek en het stadsverwarmingsbedrijf zijn dynamisch en hangen af van fluctuerende variabelen zoals de aardgasprijs en de spotprijs op elektriciteit. Aankoop van warmte van Skjern Papierfabriek is steeds de meest voordelige optie voor het stadsverwarmingsbedrijf.



### Facts about this case

**Installed heat capacity:** 3 x 1.33 MW heat pumps + 2.0 MW direct heat exchange

**Heat source:** Low-temperature heat from the production process (43 °C)

**Heat pump COP:** 6.9

**Production:** 52 % of the district heating is based on waste heat from Skjern Papirfabrik

**Investment cost:** € 670,000 (Skjern Fjernvarme) and € 3.0 M (Skjern Papirfabrik)

**Payback period:** 5 years (Skjern Papirfabrik)

**Period:** Finished in 2012

**District heating network:** 3196 consumers

**Link to web pages:**

<http://www.skjernfjernvarme.dk/>

<http://skjernpaper.com/>

**Contact information:**

Karsten Jørgensen, Skjern Fjernvarme, +45 9735 1444 KJ@skjernfjernvarme.dk



(Bron: 6.1-Other experience-25-case-studies – REUSEHEAT 2018 – pg12)

## 7.5.2 Energieoptimalisatie in een supermarkt in Høruphav, Denemarken

Een brand in de plaatselijke supermarkt in Høruphav dwong tot een grondige renovatie.

Verschillende energieoptimalisatie potentialen werden ontdekt, waaronder een warmteterugwinningssysteem op een lage temperatuur. Sinds 2015 wordt de overtollige warmte van het koelsysteem van de supermarkt geleverd aan het lokale stadsverwarmingsbedrijf Sønderborg Fjernvarme.

Warmte recuperatie op het nieuwe CO<sub>2</sub>-koelsysteem staat in voor de ruimteverwarming en de warm water voorziening in de volledige winkel. Door gebruik te maken van een CO<sub>2</sub>-koeleenheid liggen de koeltemperaturen van het gas hoger waardoor de restwarmte direct in het stadsverwarmingsnetwerk kan worden geleverd waardoor er geen behoefte is aan extra warmtepompen om de temperatuur te verhogen. Aanvullend op het koelsysteem is een heet watertank van 1,8 m<sup>3</sup> met een referentietemperatuur van 65 °C geïnstalleerd. De CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt met 34% verminderd door overtollige warmte uit het koelsysteem te gebruiken in vergelijking met het vorige gas gebaseerde systeem.

Het verwarmingssysteem van de supermarkt is ontworpen voor werking bij lage temperaturen wat een gunstig effect heeft op de terugverdientijd van de totale investering. Deze bedraagt minder dan 12 maanden

Wanneer het koelsysteem wordt betaald, kan overtollige warmte worden verkocht aan het lokale stadsverwarmingsnetwerk met economische voordelen voor SuperBrugsen in Høruphav.

Er is een groot potentieel in niet alleen Denemarken, maar wereldwijd, om supermarkten een geïntegreerd onderdeel van stadsverwarming te laten worden. Overtollige warmte kan zowel intern in de supermarkt worden gebruikt als aan de gebruikers van een stadsverwarmingsnet worden geleverd, wat resulteert in grote energiebesparingen. SuperBrugsen in Høruphav kan jaarlijks ongeveer 16 standaardhuishoudens van 130 m<sup>2</sup> voorzien in hun warmtebehoefte.

Facts about this case	
<b>Heat source:</b> Heat from cooling in supermarkets	<b>Period:</b> Finished in 2015
<b>Heat delivery:</b> 16 standard households of 130 m <sup>2</sup>	<b>Link to web page:</b> <a href="http://www.sonderborg-fjernvarme.dk/">http://www.sonderborg-fjernvarme.dk/</a> <a href="http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com">http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com</a>
<b>Energy optimization:</b> Heat recovery system, PV-system installed on roof, LED-lighting	<b>Contact information:</b> Sønderborg Fjernvarme, Erik Wolff, ew@sfjv.dk Danfoss, <a href="http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com">http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com</a>
<b>Investment costs:</b> € 7400 (Heat recovery system only)	
<b>Annual savings:</b> € 27,000	
<b>Payback period:</b> Less than one year	



(6.1-Other experience-25-case-studies – REUSEHEAT 2018 – pg16)

### 7.5.3 Restwarmte van een datacenter in Val d'Europe, Frankrijk

Een nieuw warmtenet in de buurt van Val'dEurope (buiten Parijs) is gericht op het gebruik van restwarmte van een lokaal datacenter. Er werd een nieuw lokaal stadsverwarmingsnetwerk met in totaal 4 km distributiepijpleidingen aangelegd en de verwarming van nabijgelegen gebouwen worden hieraan gekoppeld. Het datacenter bevindt zich in het gebied Bailly-Romainvilliers, een nieuw ontwikkelingsgebied. Het datacenter zal 24 uur per dag werken, het hele jaar door en om oververhitting te voorkomen, worden de servers continu gekoeld met behulp van een koelsysteem. De restwarmte van de serverkoeling wordt teruggewonnen en gebruikt voor het verwarmen van nabijgelegen gebouwen.

Het systeem bestaat uit twee warmtewisselaars die zijn aangesloten op het warmteterugwinningsnetwerk. Verder wordt een aardgasboiler gebruikt om temperaturen te verhogen wanneer nodig en om piekbelastingen op te vangen. De warmtewisselaars kunnen stadsverwarmingswatertemperaturen tussen 48 en 55 °C leveren met een totale thermische capaciteit van 7,8 MW, die uit het datacenter kan worden gehaald.

Verwacht wordt dat het datacenter 90% van de toekomstige warmtebehoefte van de aangesloten gebouwen kan bieden. Hiermee wordt een jaarlijks verwarmingsverlies van 20.000 MWh vermeden en wordt jaarlijks meer dan 4000 ton CO<sub>2</sub>-equivalent bespaard. De kans dat het project volledig wordt gerealiseerd, wordt

versterkt door de duurzame energieretourwinning. Hierdoor worden de totale warmtekosten verlaagd en profiteren de warmtepijzen verder van een verlaagde btw. Het totale project wordt geraamd op 3,46 miljoen euro, waarvan het project hulp ontvangt van ADEME, het Franse agentschap voor milieu- en energiebeheer.

Het totale project is een gedecentraliseerd alternatief voor stadsverwarmingsnetwerken zonder investeringsrisico's voor gedragen door publieke actoren. De energieretourwinning is zowel groen als duurzaam omdat het profiteert van een lokale energiebron, waardoor de milieu-impact wordt verminderd. Omdat het datacenter het hele jaar door opereert, zijn de warmtepijzen laag en zullen naar verwachting relatief stabiel zijn.

Facts about this case	
<b>Installed heating capacity:</b> 7.8 MW	<b>Period:</b> Project begun in 2013
<b>Heating source:</b> Cooling of data centre	<b>Organization:</b> Dalkia
<b>Production:</b> Approximately 20,000 MWh annually. The data centre is operating all year round	<b>Link to web page:</b> <a href="https://www.dalkia.fr/">https://www.dalkia.fr/</a>
<b>Investment costs:</b> € 3.46 M (€ 1.0 M aide from ADEME)	<b>Contact information:</b> Dalkia, Quartier Valmy - Space 21, 33 Rond Square, 92.981 Paris La Défense Cedex



(6.1-Other experience-25-case-studies – REUSEHEAT 2018 – pg16)

#### 7.5.4 Industriële restwarmte en transmissie in Leiden, Nederland.

Het project Warmtelevering Leidse Regio (WLR) betreft de overbrenging van industriële restwarmte van de haven van Rotterdam naar de regio Leiden. In november 2017 werd een projectovereenkomst ondertekend die een duurzame verwarmingsooplossing voor de lokale gemeenschap mogelijk maakt.

Het WLR-project is een engagement tussen het verwarmingsbedrijf Warmtebedrijf Rotterdam en het energiebedrijf Nuon. Door het grotere Leidse gebied te voorzien van industriële restwarmte vanuit de Rotterdamse haven, kunnen ongeveer 13.000 huishoudens en 200 bedrijven mogelijk worden voorzien van duurzame verwarming. Het project omvat een belangrijke leiding van 43 km dat zorgt voor warmtedistributie van de haven naar de stad en weer terug.

De hoge temperatuur restwarmte wordt vanuit de haven van Rotterdam afgevoerd via een pompstation. De verwarming wordt getransporteerd naar een verwarmingsstation in Leiden, waar het wordt verspreid naar het reeds bestaande stadsverwarmingsnetwerk. De restwarmte die na het stadsverwarmingsnetwerk nog aanwezig is, heeft nog steeds een groot energiepotentieel dat wordt gebruikt in de brouwerij Heineken. Hier wordt de restwarmte op een lage temperatuur van de gebruikt om hete stoom voor brouwprocessen te produceren via elektrisch aangedreven warmtepomp. Het gekoelde water wordt teruggevoerd naar de haven van Rotterdam



