Stoomproductie in de energietransitie

Fossiele brandstoffen zullen in de (nabije) toekomst verdwijnen. Sinds de industriële revolutie worden fossiele brandstoffen gebruikt voor de productie van stoom. Het klimaatactieplan zet de industrie ertoe aan op zoek te gaan naar alternatieven : de transitie naar CO_2-neutrale stoomproductie. Maar wat zijn nu juist die alternatieven ?

Zowel ENERGIK vzw als de leden van de stuurgroep van het Platform voor Duurzaam Stoomgebruik hebben in hun industriële contacten moeten vaststellen dat de stoomindustrie nog altijd een slecht zicht heeft op de hernieuwbare alternatieven die gebruikt kunnen worden voor CO_2-neutrale stoomproductie. Om die reden probeerde het Platform voor Duurzaam Stoomgebruik via een studiedag op 8 mei 2019 de Belgische stoomgebruikers te informeren over de mogelijke alternatieven. Met behulp van deze subsidieaanvraag wenst het Platform voor Duurzaam Stoomgebruik de Belgische stoomindustrie daarover verder te informeren.

inhoud

State of the art : huidige gebruik van fossiele brandstoffen	3
Technologieën van de toekomst	6
Alternatieve brandstoffen	6
De afgasketel - restwarmterecuperatie	6
Biobrandstoffen en afval	8
E-fuels en carbon capture and utilization	10
Alternatieve energiebronnen	14
Geothermie	14
Zonne-energie	16
Stoomgeneratie met elektriciteit	19
Elektrische stoomgeneratoren	19
Hogetemperatuurwarmtepomp	19
Conclusie	22
Referenties	23

colofon

uitgave : Vlaams Energie- en Klimaatagentschap

auteurs :	met referentie [1]	*Jasper Nonneman, Thomas Schoonjans, Judith Vander Heyde, Michel De Paepe*	behoren tot	*Department of Electromechanical, Systems and Metal Engineering, Sustainable Thermo-Fluid Energy Systems research team, Ghent University, Belgium*
	met referentie [2]	*Marnix van Belleghem*	behoort tot	*Deconinck – Wanson*
	met referentie [3]	*David Lagrou*	behoort tot	*Flemish Institute of Technological Research (VITO), Mol, Belgium*
	met referentie [4]	*Erik Verdeyen*	behoort tot	*Qpinch*
	geen referentie	*Viessmann*		

dank aan : ENERGIK, Het Stoomplatform, Jozef De Borger, Julien Blondeau (VUB), Callens, Deconinck-Wanson, Valérie de Groote (Indea), Frederiek De Meyer (ENGIE), Frank Koninckx (Kovia), David Lagrou (VITO), Jan Mertens (ENGIE), Spirax-Sarco, Erik Verdeyen (Qpinch), Koen Vermout (Azteq), Sebastian Verhelst (UGent), Viessmann, Vyncke.

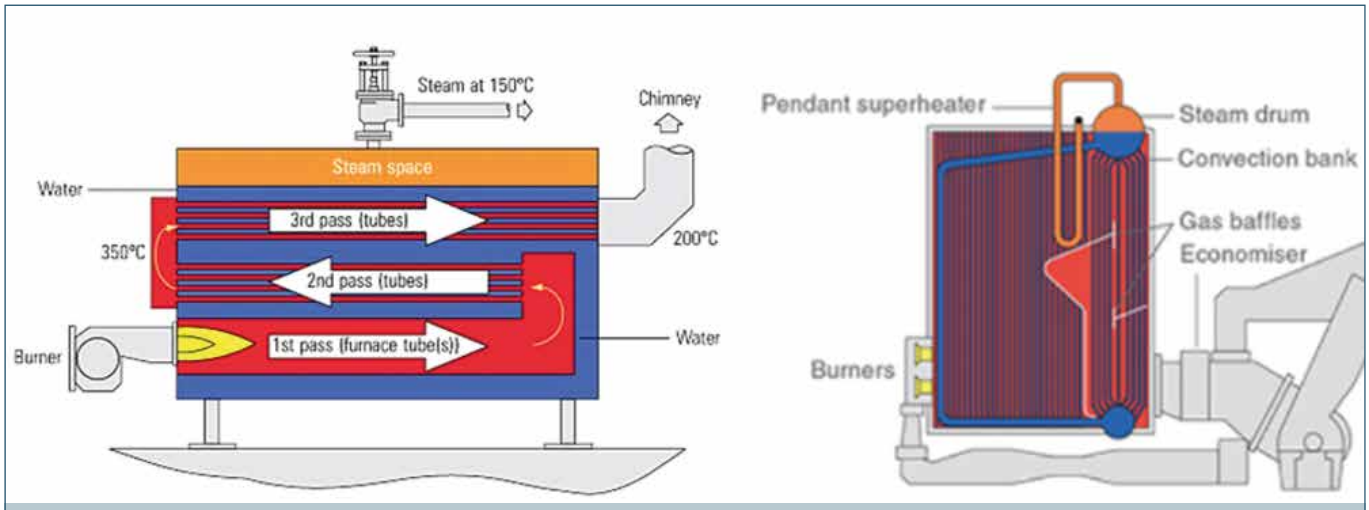
State of the art : huidige gebruik van fossiele brandstoffen

Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Michel De Paepe[1], Viessmann

De meeste industriële stoomketels halen hun energie vandaag nog altijd uit de verbranding van fossiele brandstoffen. Die stoomketels kunnen we voornamelijk onderverdelen in twee grote groepen : waterpijpketels enerzijds en vlampijpketels anderzijds.

Bij waterpijpketels stroomt het water in buizen die door de vuurhaard en het rookgaskanaal lopen. Vlampijpketels werken omgekeerd : buizen doorstroomd met rookgassen, lopen door een watervat. Vlampijpketels ondervinden door hun grote waterinhoud minder thermische spanningen en ze zijn ook beter in het opvangen van pieken van stoomvraag. Waterpijpketels zijn dan weer compacter, kunnen een hogere druk behalen en bereiken hun operationele temperatuur ook sneller door de lagere thermische inertie. Waterpijpketels zijn dus ideaal voor een constante stoomvraag bij hoge druk, zoals het geval is in elektriciteitscentrales.

Tot slot wordt ook vaak stoom gegenereerd via een warmte-krachtkoppeling (wkk). De rookgassen afkomstig van een inwendige verbrandingsmotor of gasturbine worden daarbij gebruikt om stoom te produceren. Een wkk-installatie heeft doorgaans een elektrisch rendement van 30 tot 42% en een thermisch rendement van 40 tot 55% afhankelijk van hoe goed de laagwaardige



Figuur 1 : Vlampijpketel (links) en waterpijpketel (rechts) [2]

warmte benut wordt [1]. Het ontwerp van een wkk-stoomketel is identiek aan dat van afgasketels en wordt dus in een verdere paragraaf besproken.
Het ontwerp van de eerste vlampijpketel dateert al van eind achttiende eeuw, toen de Amerikaanse ingenieur Oliver Evans tot de conclusie kwam dat een cilindrische vorm het beste bestand is tegen de grote krachten die inwerken op een hogedrukstoomketel. Daartoe ontwikkelde hij een lange cilindrische smeedijzeren horizontale ketel waarin één enkele vuurbuis was verwerkt met aan één van de uiteinden de vuurhaard. De rookgassen vertrokken vanuit de vuurhaard en werden vervolgens omgekeerd aan het eind van de ketel om dan via pijpen door het ketelvat terug te keren om bij de schoorsteen te komen. Dat was de eerste tweetreksketel. Die eerste ketel kon een werkdruk halen van ongeveer 3 à 4 barg.

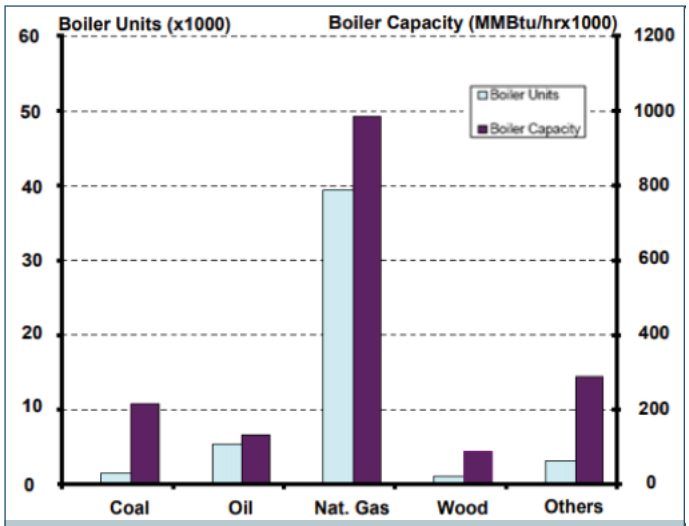
In de tweehonderd jaar die sindsdien zijn verstreken, is het ontwerp van de vlampijpketel sterk geëvolueerd en geoptimaliseerd om zo een hogere werkingsdruk, een hogere efficiëntie en een hogere productiecapaciteit te behalen. Vooral de overgang van het gebruik van klinknagels naar lassen zorgde constructietechnisch voor een revolutie. Samen met nieuwe veiligheidsinstrumentatie zoals druk-, temperatuur, en waterpeilbegrenzers halen de huidige industriële standaardketels makkelijk een capaciteit tot 30 ton per uur met druk tot boven de 25 bar [3]. Ook werkt men nu meestal met drietreksketels om zo nog meer warmte uit de rookgassen te onttrekken, vooraleer ze via de schouw worden afgevoerd.

Aangezien bij een waterpijpketel het water door buizen met een relatief kleine diameter loopt, in plaats van in een groot vat, kan in een waterpijpketel een veel hogere werkingsdruk worden gerealiseerd voor dezelfde mechanische belasting. Waterpijpketels zijn ook beter geschikt voor productie van grote stoomdebieten. Waterpijpketels kunnen tot 1800 ton stoom per uur produceren met een werkingsdruk tot 160 bar [4]. In zogenoemde superkritische elektriciteitscentrales is men in staat om een

nog hogere druk te behalen, tot 330 bar. Zulke hoge druk is alleen interessant voor elektriciteitsproductie. De maximumdruk die wordt gebruikt binnen de procesindustrie is meestal rond de 40 bar. Varianten op waterpijpketels worden daarom vooral gebruikt in elektriciteitscentrales. Een uitzondering is de spiraalketel, dat is een waterpijpketel die stoom produceert met een werkingsdruk typisch voor industriële toepassingen.

De fossiele brandstoffen die gebruikt worden in klassieke stoomketels zijn steenkool, stookolie en aardgas. Aan het begin van de twintigste eeuw werd steenkool als grootste energiebron vervangen door stookolie aangezien stoomketels met een stookoliebrander eenvoudiger en robuuster zijn in gebruik. Steenkool wordt in West-Europa vandaag nog zelden gebruikt voor industriële stoomketels. Het ontginnen en verbranden van steenkool (94,7 kg CO_2/GJ) leidt tot meer CO_2-uitstoot dan stookolie (71,9 kg CO_2/GJ) of aardgas (56,1 kg CO_2/GJ) [5]. Bovendien zijn stoomketels op steenkool moeilijker te opereren, vragen ze meer onderhoud door de grote hoeveelheid roet en hebben ze een lagere efficiëntie. Een stoomketel op steenkool heeft een lagere efficiëntie omdat het moeilijker is om een complete verbranding te realiseren van een vaste stof en omdat hogere roet- en asafzetting de warmteoverdracht verhindert. In grote elektriciteitscentrales wordt steenkool wel nog gebruikt, vooral dan bijvoorbeeld in Oost-Europa of Azië. Om toch een zo compleet mogelijke verbranding te bereiken en zo de efficiëntie te vergroten, wordt de steenkool verpulverd tot kleine partikels (< 0,3 mm) en wordt een iets groter overschot aan lucht gebruikt. Door middel van een rookgasbehandeling en het gebruik van filters tracht men ook de milieu-impact te beperken.

Tegenwoordig maken de meeste industriële stoomketels binnen West-Europa gebruik van aardgas. In vergelijking met stookolie en steenkool, zorgt de verbranding van aardgas voor de laagste uitstoot van CO_2 en fijn stof. Aardgas is vaak ook de goedkoopste optie en bovendien is het makkelijk verkrijgbaar via het gasnetwerk. Stoomketels op stookolie zijn veelal duurder en slechter voor het milieu dan die op aardgas. Dat komt vooral omdat stookolie onder andere meer zwavel bevat, waarvoor een strenge wetgeving geldt. Stookolie wordt dus normaal alleen gebruikt als er geen aardgasaansluiting voorzien is of als back-up.



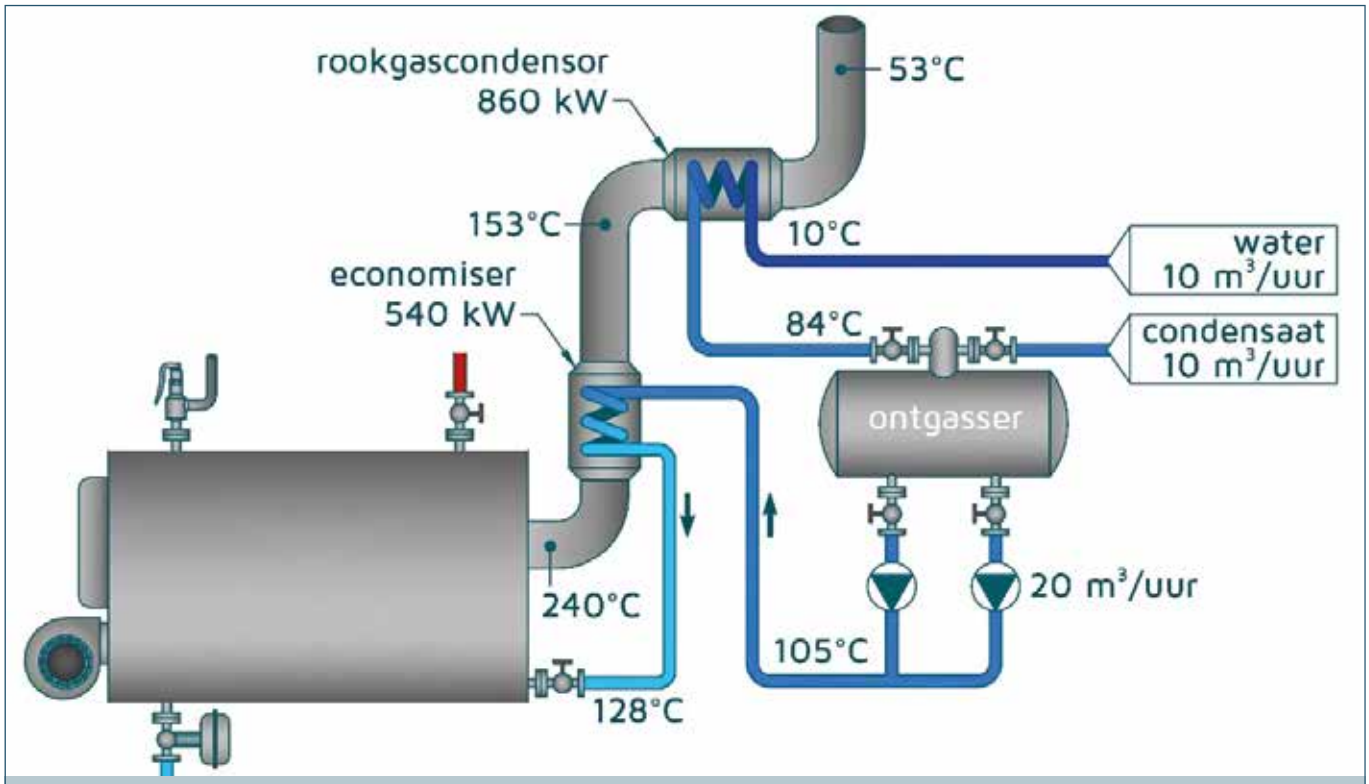
Figuur 2 : Verdeling van boilers volgens primaire brandstof (US 2010) [6]

Sinds het groeiende bewustzijn van de klimaatopwarming werd vooral de zoektocht naar een lagere uitstoot en een hoger rendement de drijvende kracht van recente verbeteringen. Zo zijn stoomketels in de loop der jaren een stuk performanter geworden en werken de meeste ketels nu met aardgas. Een moderne standaardketel haalt nu, ten opzichte van de onderste verbrandingswaarde, een rendement van rond de 90% [3]. Dat wil zeggen dat 90% van de energie die vrijkomt bij de verbranding rechtstreeks resulteert in de productie van stoom.

De energie die vrijkomt bij verbranding wordt gekwantificeerd door de zogenoemde verbrandingswaarde, uitgedrukt in energie per kg brandstof. De efficiëntie van een stoomketel wordt meestal berekend op basis van de zogenoemde onderste verbrandingswaarde (lower heating value (LHV)). Naast een hoger rendement scoren moderne ketels ook beter op het vlak van SO_2- en NO_x-uitstoot door verbeteringen in het ontwerp van de branders. Bovendien zijn de huidige gasbranders regelbaar waardoor men het nodige vermogen perfect kan afstemmen op de vraag.

Door een economiser en / of rookgascondensor toe te voegen kan het rendement van de installatie nog verder verhoogd worden. Een economiser is een warmtewisselaar die aan het einde van het rookgaskanaal wordt geplaatst om het ketelvoedingswater voor te verwarmen. De extra restwarmte die zo uit de rookgassen wordt onttrokken zorgt ervoor dat rendementen tot 95% (op LHV) haalbaar zijn [3]. Wel moet erop gelet worden dat de rookgassen niet gekoeld worden tot onder het dauwpunt, aangezien dat zou leiden tot corrosie in de installatie.

Indien er met aardgas gewerkt wordt, kunnen de rookgassen, met behulp van een rookgascondensor, wel gekoeld worden tot beneden het dauwpunt. De roestvrijstalen warmtewisselaar wordt achter de economiser geplaatst en werkt volgens hetzelfde principe, behalve dat de wisselaar ervoor gemaakt is om onder het dauwpunt te werken. Door de condensatiewarmte te gebruiken, is het mogelijk om een rendement tot 99% (op LHV) te behalen [3]. Ketels met een economiser en condensor zijn uiteraard wel een stuk duurder in aankoop, maar zeker bij installaties die praktisch volcontinu draaien, zijn die hogere kosten vaak al in drie à vier jaar terugverdiend. De kostprijs van 1 ton stoom is namelijk bijna volledig bepaald door de brandstofkosten. Let wel op, een schouw die in het verleden ooit rookgassen van zwavelhoudende brandstoffen afvoerde, kan nooit rechtstreeks gekoppeld worden op een condenserende ketel. Het ‘schouw binnen schouw’-principe dient dan toegepast te worden (een roestvrijstalen schouw wordt dan in de bestaande schouw geschoven).



Figuur 3 : Stoomketel met economiser en condensor [5]

Concreet voorbeeld van ketelrendement met en zonder economiser / condensor op basis van de gegevens in figuur 3

Op basis van de bovenstaande temperatuurgegevens kunnen we volgende ketelrendementen afleiden :

- Zonder economiser en condensor
  - Geldende rookgastemperatuur : 240 °C, aangenomen % O_2-overmaat : 3%
  - Ketelrendement : 88,6% (t.o.v. LHV)
- Met economiser, zonder condensor
  - Geldende rookgastemperatuur : 153 °C, aangenomen % O_2-overmaat : 3%
  - Ketelrendement : 92,7% (t.o.v. LHV)
- Met economiser en condensor
  - Geldende rookgastemperatuur : 53 °C, aangenomen % O_2-overmaat : 3%
  - Ketelrendement : 98,9% (t.o.v. LHV)

Een rendement van 90% stemt overeen met een rookgastemperatuur van 200 °C en een % O_2-overmaat van 3% in de rookgassen. Een rendement van 95% stemt overeen met een rookgastemperatuur van 100 °C en een % O_2-overmaat van 3% in de rookgassen.

Een manier om de uitstoot van fossiele brandstoffen te vermijden is aan de hand van carbon capture and utilization or storage (CCUS). Daarbij wordt het CO_2 dat vrijkomt bij de verbranding niet uitgestoten maar opgevangen en gebruikt (utilization) of opgeslagen (storage). In het geval van opslag spreekt men dan van opslag in uitgeputte gasvelden of steenkoolmijnen. De opgevangen CO_2 kan echter ook gebruikt worden in bijvoorbeeld de chemische of voedingsindustrie. Het is ook mogelijk met het CO_2 en hernieuwbare energie een e-fuel te maken. Dat wordt in meer detail besproken in de sectie 'e-fuels en carbon capture and utilization'.

Het implementeren van carbon capture is op dit moment, zeker op ketelniveau, nog duur en wordt dus nauwelijks gebruikt. Het scheiden van CO_2 en stikstof is namelijk niet evident. Een alternatief is dus verbranding met zuivere zuurstof in plaats van met lucht, de zogenoemde oxyfuel combustion. Op die manier blijft alleen CO_2 over na condensatie van de waterdamp. Productie van pure zuurstof is ook energie-intensief, maar daar wordt in deze folder niet verder op ingegaan. Verder bestaat er voor het opgevangen CO_2 ook nog geen gestandaardiseerd systeem met betrekking tot gebruik of opslag.

Technologieën van de toekomst

Alternatieve brandstoffen

De afgasketel – restwarmterecuperatie

Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Michel De Paepe[1]

In een afgasketel wordt restwarmte gebruikt om stoom te produceren. Die restwarmte neemt in de meeste gevallen de vorm aan van warme rookgassen afkomstig van een oven of van een inwendige verbrandingsmotor of gasturbine. In die laatste twee gevallen spreekt men dan over een warmte-krachtkoppeling of wkk. In principe vindt er dus geen verbranding plaats in een afgasketel, tenzij er wordt bijgestookt.

Bijstoken kan op twee manieren : klassieke bijstook en koudeluchtbedrijf. Bij klassieke bijstook wordt het zuurstofoverschot in de rookgasstroom gebruikt en wordt dus alleen brandstof toegevoegd. Bij koudeluchtbedrijf wordt ook lucht toegevoegd. Op die manier kan er nog altijd stoom worden geproduceerd zelfs als de oven of wkk buiten gebruik is. De warmte in een afgasketel hoeft niet afkomstig te zijn van rookgassen en kan bijvoorbeeld ook worden geleverd door een andere processtroom of door een reactorvat waarin een exotherme reactie plaatsvindt.

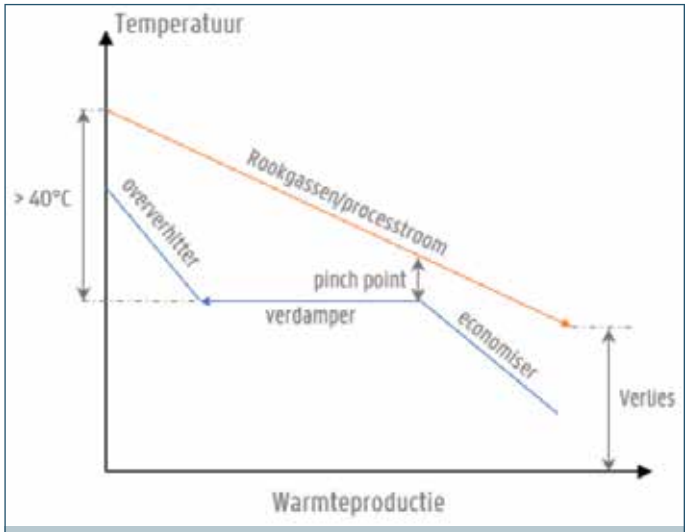
Een afgasketel bestaat, net zoals een klassieke ketel, uit een economiser, een verdamper en eventueel een oververhitter. Omdat er in een afgasketel weinig of geen verbranding optreedt, is de afgasketel een soort kruising tussen een klassieke ketel en een economiser. Het exacte ontwerp van de ketel hangt af van de specifieke combinatie van de inlaattemperatuur en het afgasdebiet of dus het beschikbare vermogen. Aangezien die natuurlijk sterk afhangen van de toepassing die de warmte levert, is een afgasketel bijna altijd maatwerk. Het is wel mogelijk om dezelfde twee grote categorieën te onderscheiden zoals bij klassieke ketels: vlampijpafgasketels enerzijds en waterpijpafgasketels anderzijds. Merk op dat, indien er niet wordt bijgestookt, er geen vlam aanwezig is in een vlampijpafgasketel. Vlampijpafgasketels zijn, net zoals hun klassieke tegenhanger, eerder geschikt voor lagere druk en de lagere vermogens. Vlampijpketels bieden het strategische voordeel van een grote thermische inertie, dat is voordelig voor processen die gekenmerkt worden door grote fluctuaties in warmteaanbod en/of stoomafname. Ze zijn inzetbaar bij inlaattemperaturen vanaf 200 °C en voor vermogens onder de 9 MW (inkomend) [7]. Deze ketels zijn in staat om stoom te leveren met een werkingsdruk van 0 tot ongeveer 30 bar [7].

Figuur 4 : Vlampijpafgasketel: Deconinck-Wanson 7T/u (links) [8] en Viessmann (rechts) [9]

Waterpijpafgasketels zijn dan weer beter geschikt voor de productie van grote, constante stoomdebieten en ook voor hogedrukstoomproductie. Een gespecialiseerde variant van de waterpijpafgasketel is de eenpijpsketel. In dit ontwerp ondergaat het voedingswater één continu pad. Er zijn dus geen drums aanwezig en er wordt ook geen onderscheid gemaakt tussen economiser, verdamper en oververhitter. Dat zorgt voor extra flexibiliteit aangezien de verschillende secties kunnen groeien of krimpen op basis van de hoeveelheid toegevoerde warmte.

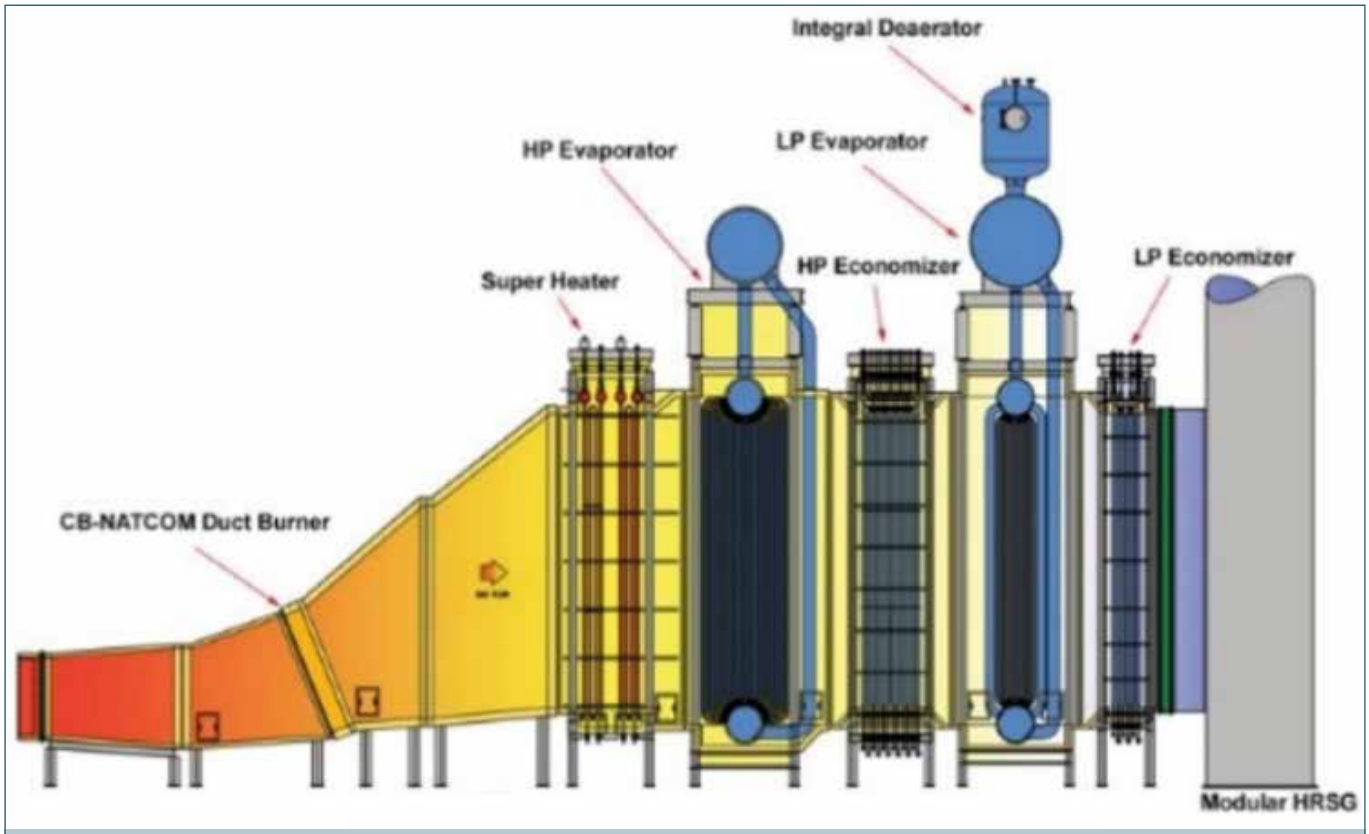
Voor zowel vlampijp- als waterpijpafgasketels geldt : hoe hoger de gewenste druk, hoe hoger de saturatietemperatuur van het water en dus ook hoe hoger de temperatuur van de warmtebron dient te zijn. Als de temperatuur van de warmtebron (te)

beperkt is, zal natte stoom gegenereerd worden en is het dus belangrijk om een goede stoomafscheider te plaatsen. Om na te gaan of de proceswarmte van voldoende hoge temperatuur is, kan volgende vuistregel gevolgd worden : een delta T van minimaal 40 °C tussen verzadigde stoomtemperatuur en intrede rookgastemperatuur is aangewezen. Om stoom van 10 barg te produceren (saturatietemperatuur van 180 °C), is dus een minimale rookgastemperatuur van 220 °C vereist. Een afgasketel plaatsen is meestal rendabel vanaf 500 kW nuttig vermogen.



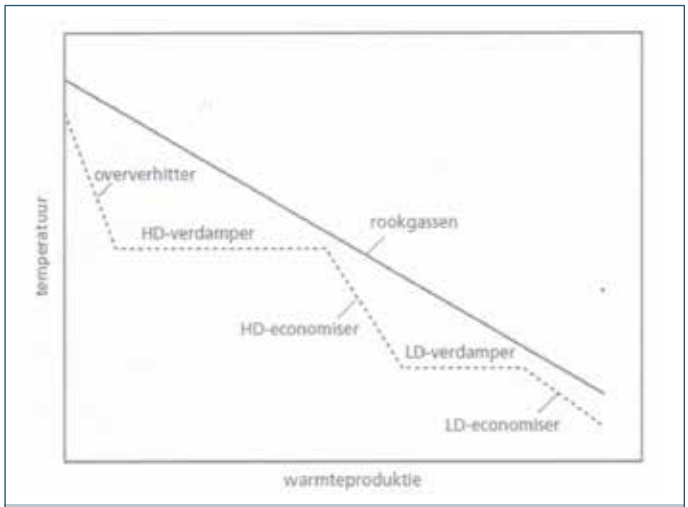
Figuur 5 : Warmtetransfer in een afgasketel

De efficiëntie van een afgasketel hangt, net zoals bij een klassieke ketel, af van hoe goed de inkomende warmte wordt benut. Hoe meer de rookgassen worden gekoeld, hoe hoger de efficiëntie van de afgasketel. Het rendement van de ketel kan worden verhoogd door het temperatuurverschil in het zogenoemde pinch point te minimaliseren. Bij een kleiner temperatuurverschil in het pinch point, is het benodigde oppervlak voor warmteoverdracht echter groter. De investeringskosten en drukval zullen bijgevolg ook groter zijn. Met behulp van een economiser en, indien mogelijk, rookgascondensor kunnen de rookgassen of processtroom ook verder afgekoeld worden waardoor de efficiëntie van de ketel sterk stijgt. Figuur 5 geeft een overzicht van de warmteoverdracht binnen een afgasketel.



Figuur 6 : Waterpijp afgasketel met hogedruk- en lagedrukstoomproductie [10]

Als een warmtebron van voldoende hoge temperatuur en voldoende hoog vermogen beschikbaar is, is het interessant om sequentieel stoom te produceren bij hogere druk en bij lagere druk. Op die manier wordt de beschikbare warmte optimaal benut, zoals ook te zien is in figuren 6 en 7.



Figuur 7 : Temperatuurdiagram van afgasketel met hogedruk- en lagedrukstoomproductie [7]

Biobrandstoffen en afval

Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Michel De Paepe[1]

Van alle ketels die gebruikmaken van een alternatieve energiebron, zijn die op biomassa op dit moment het meestvoorkomend. Biomassa kan verschillende vormen aannemen zoals bijvoorbeeld : houtpellets, dierlijke residuen, biomethaan en (de residuen van) landbouwgewassen. Kortom het zijn producten of residuen van biologische oorsprong of die biologisch afbreekbaar zijn. Ook afval van niet-biologische oorsprong wordt in deze sectie besproken omdat het vergelijkbare eigenschappen heeft met sommige vormen van biobrandstof. Bovendien is ongeveer de helft van al het stedelijke afval biomassa [17].

Voor de echte biobrandstoffen kan een onderscheid gemaakt worden tussen drie groepen :

- Primaire biomassa is rechtstreeks afkomstig van bos- of landbouw.
- Secondaire biomassa bestaat uit de bijproducten van industriële of landbouwprocessen.
- Tertiaire biomassa bestaat uit afval dat overblijft na consumptie.

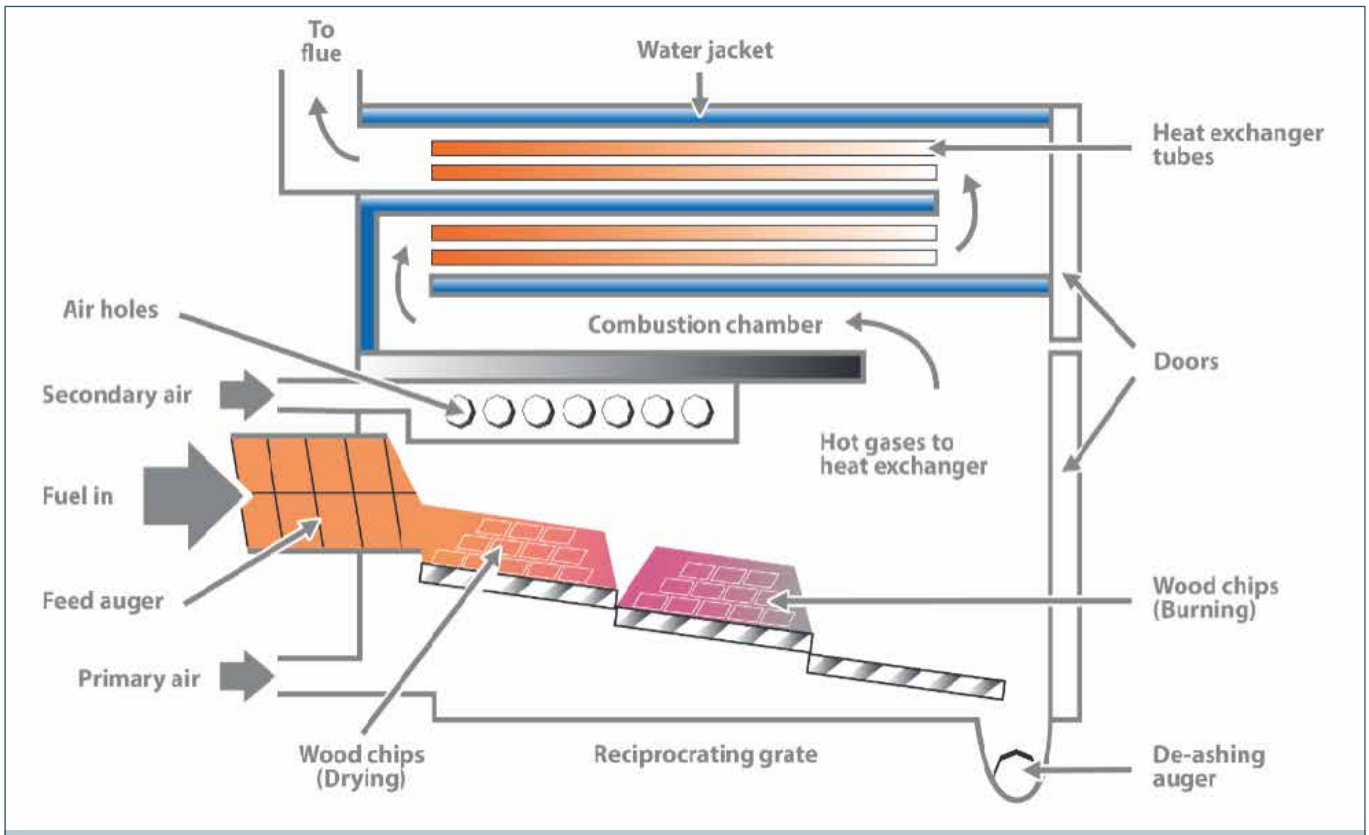
Biobrandstoffen en afval worden, net zoals fossiele brandstoffen, verbrand en daarbij komt warmte vrij die gebruikt kan worden om stoom te maken. Er zijn wel enkele belangrijke verschillen tussen bio- en fossiele brandstoffen. Zo bevatten vaste biobrandstoffen bijvoorbeeld proportioneel gezien veel meer zuurstofatomen. Daardoor heeft vaste biomassa een lagere verbrandingswaarde (7-20 MJ/kg) [11] dan bijvoorbeeld steenkool (25-30 MJ/kg) of aardgas (42-55 MJ/kg) [11]. Verder bevat biomassa over het algemeen meer vocht, alkalimetalen en chlorides.

Bij sommige vormen van biomassa moet men ook oppassen voor biodegradatie. De samenstelling van de brandstof kan bovendien zeer variabel zijn, dat is zeker het geval bij afval. Om deze redenen is het niet mogelijk om een gewone ketel met biomassa te voeden.

Figuur 8 : Verschillende vormen van biomassa : houtpellets (linksboven), voedingsafval (rechtsboven), koolzaad (linksonder), houtafval (rechtsonder)

De meeste biobrandstoffen zijn van vaste vorm (75%) en vooral houtachtig, 12% bestaat uit biostookolie en 13% uit biogas [11]. Biostookolie en biogas worden meestal ontgonnen uit vaste biomassa via transesterificatie of fermentatie. Het ontwerp van een biomassaketel die gebruikmaakt van biogas of biostookolie leunt relatief dicht aan bij het ontwerp van een klassieke ketel. Een voorbeeld is Project Gaya [12], een initiatief dat ernaar streeft om het gasnetwerk gedeeltelijk te voeden met biomethaan geproduceerd aan de hand van droge, vaste biomassa. Biomethaan heeft dezelfde eigenschappen als aardgas en kan worden gebruikt zonder enige aanpassingen te maken aan het gasnetwerk of de installatie. De rest van deze sectie heeft dan ook vooral betrekking op biomassa en afval van vaste vorm.

Er bestaan verschillende ontwerpen van vastebiomassaketels maar het meestvoorkomende ontwerp bij middelgrote installaties (100 kW – 100 MW) is de zogenoemde roosterovenketel (moving grate boiler). Die ketels zijn ook zeer geschikt voor de verbranding van afval. Ze bestaan uit een bewegend rooster dat continu met brandstof wordt gevoed. De primaire verbrandingslucht wordt aangevoerd vanonder het rooster. Er wordt vaak ook nog secundaire lucht toegevoerd boven het rooster. De rookgassen leveren de warmte die nodig is voor de productie van stoom.



Figuur 9 : Principe van een moving grate boiler

Biomassaketels die gebruikmaken van een vaste brandstof hebben een lagere efficiënte dan een klassieke ketel op aardgas. Zo is het bijvoorbeeld moeilijker om een complete verbranding van een vaste stof te realiseren. Er moet dus een grotere overmaat aan zuurstof worden gebruikt, wat het rendement van de ketel verlaagt. In grote installaties (> 100 MW) kan biomassa, indien het gaat om gestandaardiseerde pellets, verpulverd worden. De brandstof verpulveren bevordert een complete verbranding, omdat het zorgt voor een grote oppervlakte-tot-volumeverhouding.

In middelgrote installaties is brandstofverpulvering niet haalbaar. Bijgevolg worden partikels gebruikt die één, twee of zelfs drie grootteordes groter zijn, waardoor een relatief grote overmaat aan lucht gebruikt moet worden. De efficiëntie van een biomassaketel is ook lager omdat biomassa, zoals al vermeld, meestal ook meer vocht bevat. Een deel van de verbrandingsenergie gaat dus naar het drogen van de brandstof in de 'drying zone' zodat die spontaan kan ontbranden in de 'burning zone' (Figuur 9). Daardoor is er relatief gezien minder warmte beschikbaar voor stoomproductie. Die warmte kan wel worden teruggewonnen door middel van een rookgascondensor indien de brandstof dat toelaat. Ten slotte verhinderen de hogere roet- en asafzetting de warmteoverdracht.

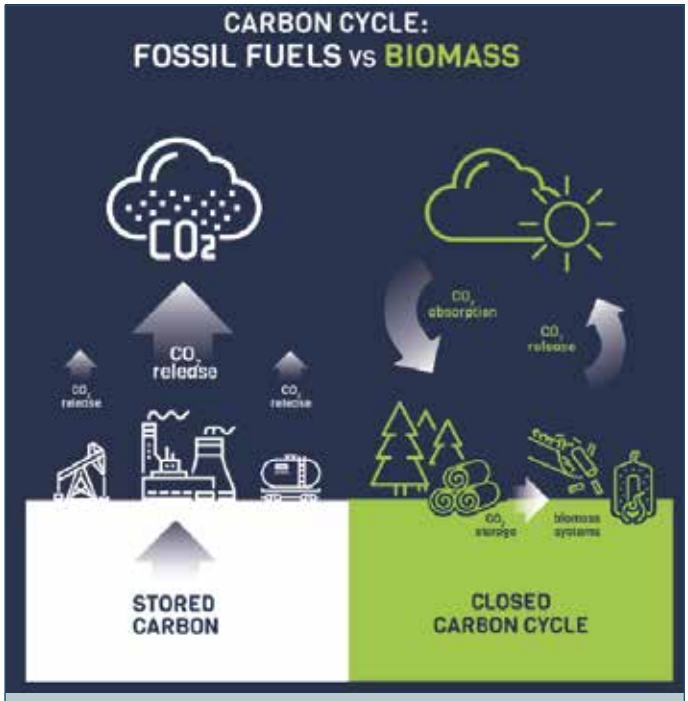
Een volledig uitgeruste industriële biomassaketel haalt een efficiëntie tot ongeveer 90% (op LHV) [13].
De grote variëteit binnen de eigenschappen van biobrandstoffen zorgt ook voor een grotere spreiding van de efficiëntie bij de verschillende ketels. In het algemeen zal een lagere hoeveelheid vocht en een hogere graad van standaardisering in de brandstof, een hogere efficiëntie opleveren. Zo zal een biomassaketel die gebruikmaakt van droge houtpellets een hogere efficiëntie halen dan een afvalketel of een ketel die compost gebruikt.

In vergelijking met klassieke ketels zijn biomassa- en afvalketels ook iets groter, iets minder responsief en vereisen ze iets meer onderhoud dan een klassieke ketel van hetzelfde vermogen. Door de lagere verbrandingswaarde vergt biobrandstof, voor dezelfde energie-inhoud, ook meer brandstofopslagruimte dan bijvoorbeeld stookolie. Biomassaketels zijn wel in staat om dezelfde stoomproductiecapaciteiten en uitgangsdrukken te halen als klassieke stoomketels.

Wat zijn nu de voordelen van een stoomketel op biomassa of een ketel op afval ? Ten eerste is het, zowel voor grote als kleine installaties, een bewezen technologie met veel verschillende leveranciers die beschikken over decennia aan ervaring. Ook zijn ketels die gebruikmaken van biobrandstof relatief flexibel. De operationele kosten van de ketel kunnen een stuk lager zijn dan die van een klassieke ketel, wanneer brandstof ter plaatse voorhanden is of als het voor een lage of zelfs negatieve prijs kan worden aangekocht. Ten slotte hebben stoomketels op biomassa natuurlijk de mogelijkheid om koolstofneutraal te zijn, al zijn ze dat niet per definitie.

Afvalketels zijn in principe niet koolstofneutraal, maar de verbranding van afval wordt toch verkozen boven storten. Stoomproductie met afval is netto ook milieuvriendelijker dan stoomproductie met fossiele brandstof. Of een biomassaketel al dan niet effectief koolstofneutraal is, hangt af van de oorsprong van de biomassa. Zolang men evenveel biomassa gebruikt als er daadwerkelijk aangroeit, is biomassa een duurzame brandstof. Op die manier is de zogenoemde koolstofkring namelijk gesloten. Voor houtachtige en agrarische biomassa is het bijvoorbeeld mogelijk om de duurzaamheid te garanderen door biomassa aan te kopen dat beschikt over een 'certificaat van duurzaamheid'.

Voorbeelden van zulke certificaten zijn FSC, PEFC, SBP en SURE. Die certificaten garanderen een duurzaam beheer waarbij een gesloten koolstofcyclus ontstaat. Merk wel op dat duurzaam gebruik van biomassa alleen betrekking heeft op de uitstoot van CO_2. De uitstoot van andere schadelijke stoffen zoals NOx en fijn stof worden in principe niet verhinderd, maar wel beperkt door de gereglementeerde rookgaszuivering.



Figuur 10 : Gesloten koolstofcyclus [14] [15]

Een bos dat op een duurzame manier wordt beheerd, is gezonder dan een onbeheerd bos en groeit daardoor sneller. Dat wil zeggen dat, ondanks het feit dat er bomen worden geveld voor de productie van hout en biomassa, het bos netto kan blijven groeien. Een stijging van de vraag naar biomassa zorgt ervoor dat de restproducten van de houtindustrie, zoals zaagsel, gevaloriseerd kunnen worden. Dat zorgt dan weer voor een verhoogde economische interesse in houtproducten en bijgevolg in het behouden en bijplaatsen van bossen. Zo rapporteert Bioenergy Europe in zijn statistisch rapport van 2019 dat een groeiende vraag naar biomassa inderdaad zorgt voor een groei van de totale bosoppervlakte.

Tot slot wordt nog een voorbeeld gegeven van een succesvolle bio-installatie binnen de lage landen. In 2017 plaatsten drie tuinbouwbedrijven uit het Nederlandse Sirjansland (VOF Prominent Grevelingen, DT van Noord tomaten en Van Duijn aubergines) samen een bio-installatie om hun stijgende gaskosten te drukken en hun productie duurzamer te maken. Om de rentabiliteit van hun investering te verzekeren, maken de tuinbouwbedrijven gebruik van laagwaardige biomassa: zoals snoeiproducten, de houtachtige fractie van groenafval en zeefoverloop van composteertoepassingen. Op die manier konden ze hun gasbehoefte met 70% verlagen, een besparing van 6,5 miljoen kubieke meter aardgas per jaar.

E-fuels en carbon capture and utilization

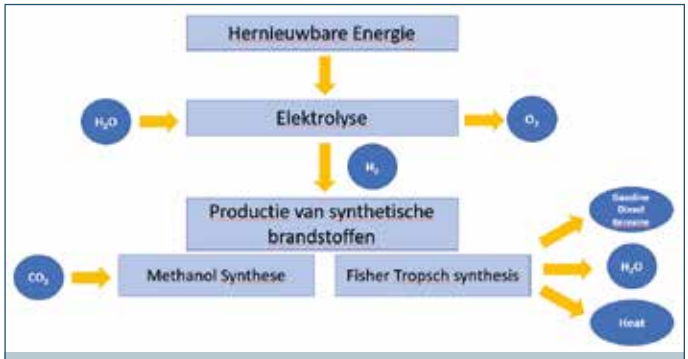
Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Marnix van Belleghem[2], Michel De Paepe[1]

E-fuels zijn synthetisch geproduceerde brandstoffen die als alternatief voor fossiele brandstoffen kunnen worden gebruikt. CO_2 of CO en 'groen' waterstofgas, ook wel e-waterstofgas genoemd, vormen de basiscomponenten voor het produceren van e-fuels. Uit hernieuwbare elektriciteit, afkomstig van zonnepanelen of windmolens, wordt 'groen' waterstofgas geproduceerd door elektrolyse van water. Koolstofdioxide kan worden opgevangen uit een geconcentreerde bron (bijvoorbeeld : rookgassen op een industriële site) of uit de lucht. Voorbeelden van e-fuels zijn e-methaan, e-methanol, e-DME evenals vloeibare koolwaterstoffen zoals e-benzine en e-diesel [16]. Merk op dat naargelang de auteur de invulling van de term e-fuels verschilt. Hij wordt als benaming gebruikt voor elke brandstof die gesynthetiseerd wordt aan de hand van groene elektriciteit. Of de term is beperkt tot vervangbrandstoffen voor de huidige fossiele brandstoffen benzine en diesel.

E-fuels zijn CO_2-neutraal enkel en alleen als het opgevangen CO_2 biogenisch is, bijvoorbeeld bij verbranding van biomassa. Bij fossiele CO_2, wordt het CO_2 uiteindelijk toch uitgestoten na verbranding van de e-fuel. Door het verbranden van een e-fuel, is verbranding van een fossiele brandstof wel vermeden.

Er zijn ook verschillende nadelen verbonden aan e-fuels. Zo zijn er eerst en vooral de productiekosten van e-fuels die tot zes keer hoger kan liggen dan de kosten voor fossiele brandstoffen (op dit moment) [17]. De verwachting is wel dat die kosten zullen dalen door schaalvoordelen, leereffecten en een vermindering in de prijs voor hernieuwbare elektriciteit. De efficiëntie voor het produceren van e-fuels ligt tussen de 40 en 50%. Dat betekent dat er zeer veel hernieuwbare energie nodig is om e-fuels te maken [18]. Dat is dan ook een van de voornaamste redenen (samen met de zeer hoge investeringskosten) waarom het moeilijk is om e-fuels op grote schaal te gebruiken. In België (en in de rest van de wereld) staat het gebruik en de productie van e-fuels nog in de kinderschoenen, de TRL (technology readiness level) is dan ook nog zeer laag. Op dit moment worden e-fuels nog niet gebruikt als brandstof voor (stoom)ketels, met als voornaamste reden de hoge (productie)kosten en de lage productie-efficiëntie.

Productie van e-fuels



Figuur 11 : Overzicht van de productie van e-fuels[16]

De productie van e-fuels bestaat uit het reageren van waterstofgas met koolstofdioxide via een conversieroute die afhankelijk is van de gewenste e-fuel, zoals te zien is in figuur 11.

Productie van waterstofgas

Bij elektrolyse wordt water opgesplitst in waterstofgas (H_2) en zuurstofgas (O_2). Twee elektroden worden ondergedompeld in het water waartussen een elektrische spanning wordt aangebracht. Daardoor komt waterstofgas vrij aan de kathode en zuurstofgas aan de anode. Er zijn verschillende elektrolyseprocessen mogelijk om waterstofgas te produceren, zowel lagetemperatuur- als hogetemperatuurelektrolyse is mogelijk [16]. E-waterstofgas kan ook het eindproduct zijn en gebruikt worden als brandstof voor verschillende toepassingen, zoals brandstofcellen, wagens of (stoom)ketels. Waterstofgas als brandstof voor (stoom)ketels is mogelijk met aanpassingen aan de conventionele stoomketel. Het zuivere zuurstofgas dat vrijkomt kan o.a. gebruikt worden in de verbranding van fossiele brandstoffen, dat wordt ook 'oxyfuel' genoemd. Het grote voordeel bij oxyfuel is dat CO_2-afvang makkelijker te realiseren is doordat de rookgassen alleen maar CO_2 en water bevatten. Deze techniek kan bijvoorbeeld helpen om in de toekomst CO_2-neutrale energiecentrales te realiseren. Nadelen daarvan zijn dat de TRL nog laag is en het produceren van zuiver zuurstofgas veel energie kost.

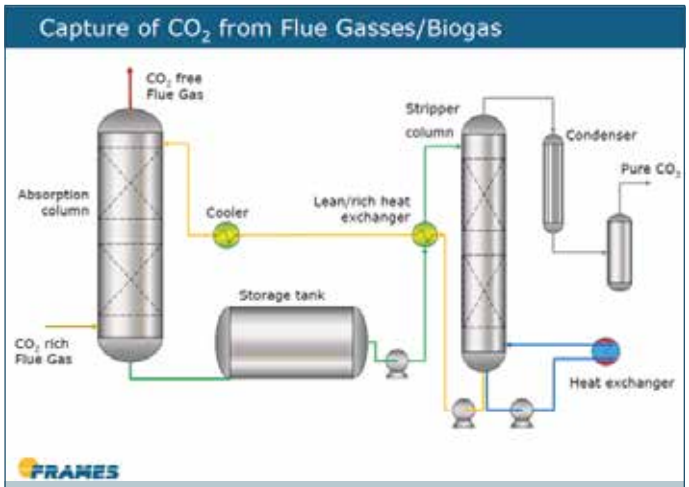
CO_2-afvang

Het opvangen van CO_2 kan vanuit de lucht, ook DAC (direct air capture) genoemd, of uit een geconcentreerde bron. Voorbeelden van geconcentreerde CO_2-bronnen zijn rookgassen, hoogovengas en cokesovengas. Het CO_2 dat vrijkomt bij verbranding van biogas en biomassa en bij het 'upgraden' van biogas kan ook opgevangen worden [18].

Bij DAC wordt via ventilatoren lucht aangezogen in het systeem, waar de CO_2 uit de lucht wordt verwijderd via processen. De CO_2 kan worden opgeslagen in een 'permanent opslagsysteem' en de lucht wordt weer vrijgelaten in de atmosfeer met een lagere concentratie CO_2 dan voordien, maar geen nulconcentratie. Het exacte proces is afhankelijk van de gebruikte technologie.

Zo kan er gewerkt worden met een kaliumhydroxideoplossing om het CO_2 te scheiden van de lucht [19]. Een andere manier is om te werken met 'hoog selectief materiaal'. Wanneer dat materiaal 'vol' zit, zal de collector sluiten en de temperatuur stijgen om zuiver CO_2 te verkrijgen [20].

Er zijn verschillende mogelijkheden voor de afvang van CO_2 uit puntbronnen. De Allam-cyclus is een hogedruk-, superkritische CO_2-cyclus, waar het gegenereerde CO_2 op een hoge druk afgeleverd wordt en dus klaar is om te gebruiken in andere processen. De dominante technologie om CO_2 te scheiden van gassen is de aminegastechnologie met mono-ethanolamineoplossingen (MEA).



Figuur 12 : Opvang van CO_2 uit rookgassen

Een voorbeeld van het opvangen van CO_2 uit rookgassen wordt getoond in figuur 12. Deze installatie voor CO_2-afvang werd gebouwd door Frames voor een project in de glastuinbouw (DES-project), waar men biogenische CO_2 produceert uit de verbranding van biomassa voor het verwarmen van de glastuinbouw met een biomassaketel [21].

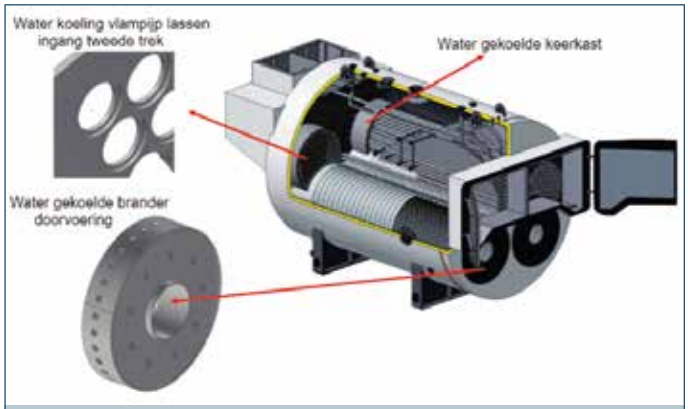
Bij deze technologie gaan de CO_2-rijke rookgassen na de verbranding van de biomassa, door een wet scrubber die de rookgassen verder conditioneert en anderzijds ook als condensor functioneert. In een volgende stap worden de rookgassen door een absorber geleid waar de Gallaxol, een milieuvriendelijk oplosmiddel, het CO_2 opneemt. De andere gassen verlaten de absorber via een klassieke schoorsteen. Gallaxol, dat het CO_2 heeft opgevangen, gaat vervolgens door een aminecondensor om het CO_2 en water vrij te maken voordat het wordt gerecycleerd naar de absorber. Water wordt nu via een condensor 'weggecondenseerd' waarbij nat CO_2 overblijft dat vervolgens wordt gedroogd door het CO_2 tot -15 °C te koelen. De installatie genereert 2,2 ton CO_2 per uur met een zuiverheid van 99,8% [21].

Toepassingen e-fuels

In België zijn er nog maar enkele projecten rond de productie van e-fuels. Die projecten zijn veelal voor hoogwaardige toepassingen in de chemiesector. In de haven van Gent is er bijvoorbeeld het North-C-Methanol-project, waar ze e-methanol maken door elektrolyse van water en captatie van CO_2 van industriële puntbronnen. De productiecapaciteit daarvan is 45.000 ton per jaar [22]. Ook in de haven van Antwerpen willen ze binnen afzienbare tijd e-methanol produceren [23]. E-fuels zijn drop-in fuels en zouden in principe al gebruikt kunnen worden in (stoom)ketels, maar op dit moment wordt dat nog niet gedaan. De voornaamste redenen zijn de productiekosten en de grote hoeveelheid hernieuwbare energie nodig om e-fuels te produceren.

Er is wel al onderzoek gedaan naar stoomketels die kunnen werken op waterstofgas. Daarvoor zijn er aanpassingen aan de conventionele stoomketel nodig voor zowel de ketel als de brander. Voor de ketel dient het thermische ontwerp opnieuw onder de loep genomen te worden en is een een-op-eenombouw van een aardgasketel naar een waterstofketel met dezelfde capaciteit niet zomaar mogelijk.

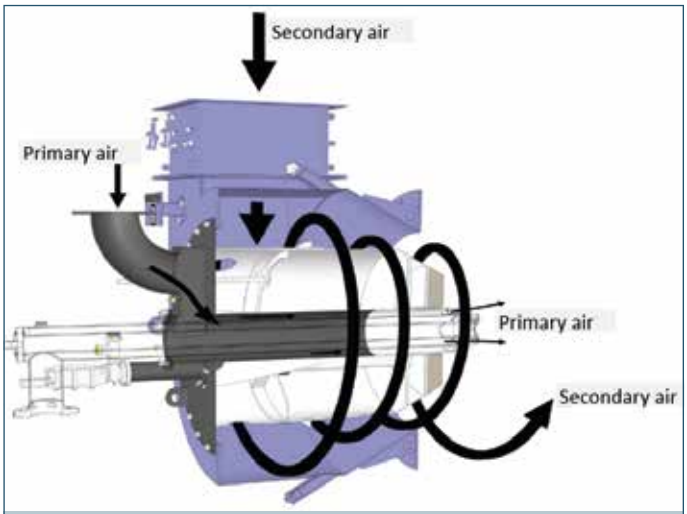
Veel moderne ketels die aardgas of andere waterstofhoudende brandstoffen verbranden, hebben al de mogelijkheid om warmte uit de gevormde waterdamp terug te winnen. Het spreekt voor zich dat dat nog van groter belang zal zijn voor ketels die alleen waterstof verbranden. Waterstofgestookte ketels zijn het efficiëntst als ze in 'condenserende modus' kunnen werken (door een nageschakelde condensor toe te passen) om ervoor te zorgen dat deze latente warmte wordt teruggewonnen. Daarnaast heeft de vlam van waterstof, hoewel de temperatuur hoger ligt, een lagere emissiviteit dan die van aardgas, net zoals aardgas een lagere emissiviteit heeft dan stookolie. Dat leidt ertoe dat warmteoverdracht in de vuurhaard moeizamer verloopt en er dus meer warmtewisselend oppervlak nodig is. Ook het rookgasvolume zal voor eenzelfde vermogen een stuk hoger liggen voor waterstof dan voor aardgas, gezien de lage densiteit van waterstof. Rookgasdebieten door de ketel zullen dus een stuk hoger zijn.



Figuur 13 : Vlampijpketel met dubbele vuurhaard
(bron : HKB Boiler Solutions, Venlo, Nederland)

Om de tegendruk in de ketel aanvaardbaar te houden is een herontwerp van de vuurhaard en vlampijpsecties aangewezen. Tot slot ligt de temperatuur van de vlam bij waterstofverbranding een stuk hoger dan bij aardgas en zijn extra ontwerpmaatregelen nodig om tot een duurzame ketel te komen. Op figuur 13 is een ketelontwerp te zien dat geschikt is voor waterstofgas. Er wordt een watergekoelde branderdoorvoer voorgesteld om om te gaan met de hoge temperaturen aan de brandermond en er zijn extra koelgroeven voorzien aan de ingang van de tweede trek (start van de vlampijpbundel) [24].

Niet alleen de ketel, maar ook de brander moet specifiek aangepast worden aan de verbranding van waterstof. In tegenstelling tot klassieke verbranding met aardgas, heeft waterstof een veel snellere verbrandingsreactie en een kortere



Figuur 14 : Basisontwerp SSB-brander van Saacke, geschikt voor H_2 *(bron : Saacke Benelux)*

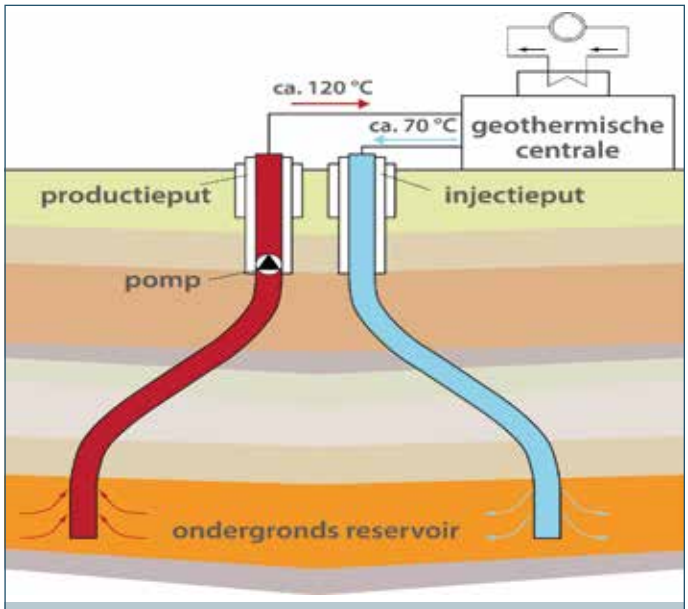
vlam. Met als gevolg hogere thermische belasting van de systeemcomponenten vooral op de voorste delen van de verbrandingskamer. In het branderontwerp dient daarom extra aandacht te gaan naar thermische weerstand enerzijds en vlamstabiliteit anderzijds. Door de hogere vlamtemperatuur op een kortere ruimte stijgt ook de vorming van thermische NO_x met een factor 2,5 tot 3 in vergelijking met de verbranding van aardgas. Dat effect kan gemakkelijk gecompenseerd worden door externe rookgasrecirculatie toe te passen. Daarbij wordt er een fractie van de rookgassen aan de uitlaat van de ketel weer aangezogen en bijgemengd in de verbrandingslucht. Als gevolg daarvan daalt de gemiddelde vlamtemperatuur, wat gunstig is voor de thermische belasting van de brander en ook de thermische NO_x-vorming doet dalen. [24].

Waterstof als brandstof heeft lange tijd op de achtergrond geopereerd en werd tot op heden vooral gebruikt in toepassingen waar waterstof als nevenproduct ontstaat van een chemisch proces. Vaak wordt het dan verbrand in combibranders die verschillende brandstoffen tegelijk kunnen verwerken zoals waterstof in combinatie met aardgas of lichte stookolie. Intussen wordt het duidelijk dat waterstof in de toekomst een belangrijke rol zal spelen in de transitie naar een duurzame en CO_2-arme economie. De technologie is er nu en kan al snel ingezet worden [24].

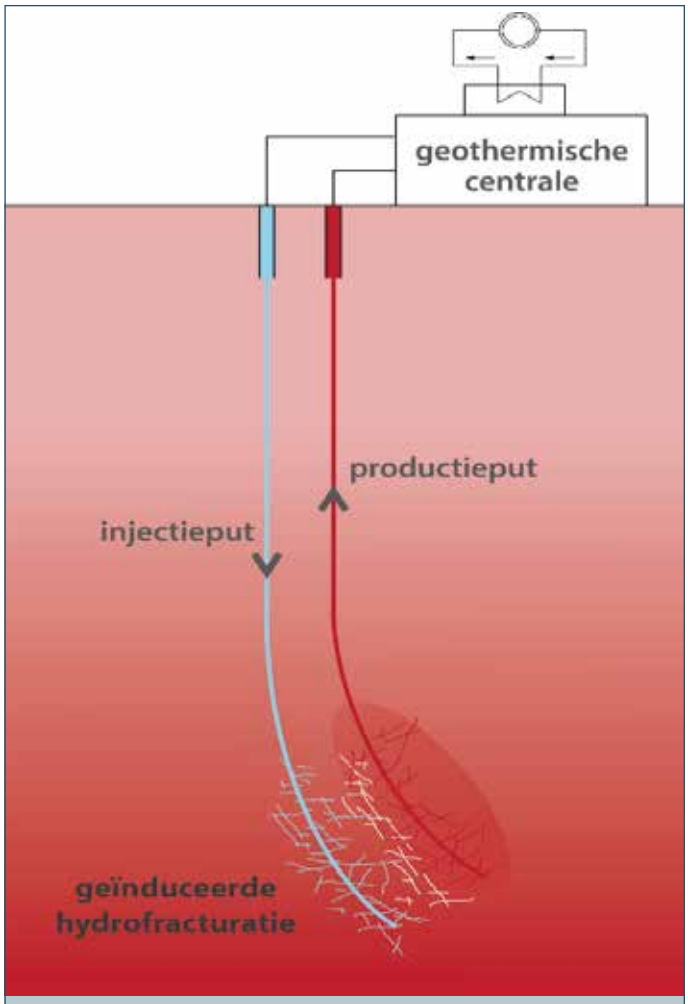
Alternatieve energiebronnen

Geothermie

Auteur : David Lagrou[3]



Figuur 15 : Hydrothermaal systeem : schematische voorstelling van een geothermisch doublet



Figuur 16 : Hot dry rock (HDR)

Aardwarmte of geothermie is een hernieuwbare, lokale en continu beschikbare bron van energie die kan helpen om onze klimaatdoelstellingen te behalen en heeft haar plaats in de energiemix van de toekomst. Nochtans is geothermie niet nieuw en wordt ze al duizenden jaren gebruikt door de mens. In Italië wordt al sinds 1904 elektriciteit opgewekt uit aardwarmte.

Aardwarmte is deels de restwarmte uit de tijd dat de aarde gevormd werd, de warmte die ontstaat door het natuurlijke radioactieve verval van elementen in de aardkorst en de warmte die ontstaat door de wrijving van onder meer aardplaten.

We spreken van 'diepe geothermie' als de aardwarmte gewonnen wordt op een diepte van minstens 500 meter onder het aardoppervlak. Die diepere systemen zorgen voor thermische energie die kan worden verdeeld via warmtenetten, industriële toepassingen en zelfs elektriciteitsproductie. Koude / warmte-toepassingen die gebruikmaken van de warmteopslagcapaciteit van de ondiepe ondergrond (< 500 meter) vallen hier dus niet onder.

De geothermische gradiënt geeft de temperatuurtoename met de diepte weer. In vulkanische gebieden, zoals IJsland en Italië, is de temperatuur al hoog op geringe diepte (> 150 °C) ; in andere gebieden moet er dieper geboord worden om gewenste temperaturen te bereiken (30 °C/km).

Werkingsprincipe

Er zijn verschillende systemen om geothermie of aardwarmte te gebruiken, zo heb je de hydrothermale systemen 'hot dry rock' en 'single well'.

Hydrothermale systemen

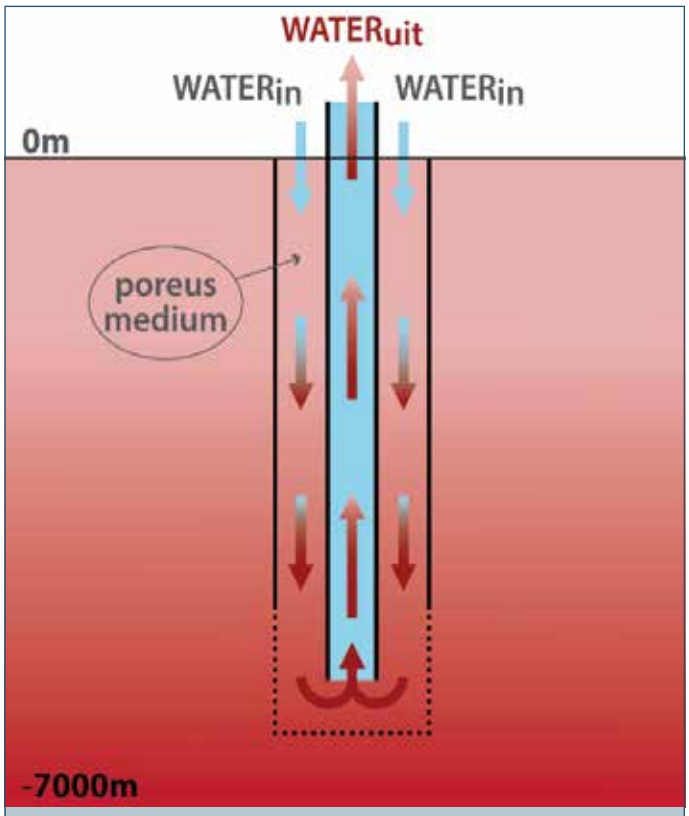
In open hydrothermale systemen wordt het aanwezige water in het ondergrondse reservoir, het formatiewater, opgepompt via een productieput en over een warmtewisselaar geleid. De vloeistof in het secundaire circuit wordt opgewarmd en het afgekoelde formatiewater wordt via een injectieput in hetzelfde ondergrondse reservoir gepompt (de boringen vormen een geothermisch doublet). Het is van belang dat het teruggevoerde water op voldoende afstand wordt geïnjecteerd om het geproduceerde water niet af te koelen. Naast de temperatuur is de doorlatendheid een bepalende factor. Er dient een voldoende hoog debiet gehaald te worden om het doublet rendabel te maken. De hoeveelheid energie die men zo kan winnen, hangt af van het temperatuurverschil (ΔT) dat je nuttig kunt aanwenden.

Wanneer de stromingseigenschappen niet volstaan, kan men trachten de verbinding tussen de poriën en spleten in het ondergrondse reservoir te verbeteren. Men spreekt in dat geval van een verbeterd ('enhanced') geothermisch systeem of EGS.

Hot dry rock[1]

Ook is het mogelijk om aardwarmte te winnen uit droge, hete gesteenten op grote diepte. Die gesteenten zijn veelal zeer compact en bevatten weinig of geen verbonden poriën. Om de warmte te winnen moet er dus een netwerk van spleten gecreëerd worden waardoor water kan circuleren. Dat doet men door water onder hoge druk in de laag te injecteren. Wanneer de druk hoog genoeg wordt, breekt het gesteente. Door zandkorrels samen met het water te injecteren, belet men dat de spleten zich weer sluiten op het moment dat men stopt met het injecteren van water. Projecten zoals in Soultz-sous-Forêts (FR) bewijzen dat het principe werkt. Met 3 boringen tot 5000 meter (165 °C) wordt 2,1 MWe geproduceerd, waarvan er 1,5 MW op het elektrische net wordt geplaatst.

Gehoopt wordt dat het op termijn mogelijk moet zijn overal ter wereld de enorme hoeveelheden energie die in diepe grondlagen opgeslagen liggen, te ontginnen. De kosten voor de ontwikkeling van een kunstmatig reservoir op grote diepte zijn wel nog zeer hoog. De uitdaging bestaat er dan ook in om die kosten te drukken. Ook VITO voert onderzoek uit naar de optimalisatie van die technieken.



Figuur 17 : Eenputsgeothermie : via een ultradiepe boring kan geothermie in principe op elke plaats worden gewonnen.

Eenputsysteem of 'single well'

Een derde manier om aardwarmte te winnen is de verticale warmtesonde. Verticale warmtesondes zijn courant voor ondiepe toepassingen, maar in feite kunnen ze net zo goed gebruikt worden om warmte te winnen op grote diepte. In zijn eenvoudigste vorm bestaat het systeem uit één boring waardoor men een warmtegeleidende vloeistof laat circuleren. De vloeistof onttrekt de warmte uit het gesteente en brengt ze naar de oppervlakte. Het voordeel van de techniek is dat ze afgesloten is van de grondlagen. De opbrengst is daardoor veel minder afhankelijk van de stromingseigenschappen van de grondlagen. Daar staat tegenover dat de hoeveelheid warmte die met één put kan worden gewonnen, kleiner is dan bij een traditioneel hydrothermaal systeem.
Bij VITO loopt momenteel onderzoek naar de eenputsgeothermie. In dit innovatieve concept wordt één zeer diepe put (7 kilometer) geboord waarin centraal water wordt geïnjecteerd, dat ondergronds opwarmt en via de buitenzijde weer naar boven wordt gepompt. Door met maar één put te werken worden de boor- en afwerkingskosten gereduceerd. En door de onafhankelijkheid van een doorlatende watervoerende laag in de diepe ondergrond wordt het geologische risico beperkt. Ook zal geen zout formatiewater circuleren met het gevaar op corrosie en neerslagen in de (bovengrondse) installatie.

Om zo diep te boren met een grotere diameter, wordt bij VITO ook onderzoek gedaan naar een nieuwe manier om sneller dan puur mechanisch te boren door harde gesteenten: het electro pulse-boren. Het principe is gebaseerd op het gebruik van schokgolven (door middel van hoogspanning) die het gesteente breken. De eerste testen zijn beloftevol en bieden de mogelijkheid tot het boren van zeer grote diameters.

Toepassing van aardwarmte

Aardwarmte kan op twee manieren worden gebruikt: direct of indirect. De keuze hangt af van de beschikbare temperatuur, de aanwezigheid van een reservoir, de beoogde toepassing en de economische context. Bij een direct gebruik wordt de energie van het warme water rechtstreeks benut om gebouwen te verwarmen, een stroomturbine aan te drijven of voor een combinatie van verwarming en stroomopwekking. De temperatuur van het water bepaalt in grote mate de mogelijke toepassingen. Indien de temperatuur van het opgepompte water niet hoog genoeg is, kunnen warmtepompen ingeschakeld worden. Een warmtepomp is een apparaat dat warmte onttrekt op een bepaalde temperatuur en die warmte bij een hogere of lagere temperatuur opnieuw afgeeft. In dat geval spreekt men van indirect gebruik van aardwarmte.

State of the art

In het buitenland heeft men al ruime ervaring met aardwarmte, dat is onder meer zo in landen als IJsland, Zweden, Italië, Turkije, Nieuw-Zeeland, USA en dichter bij huis ook Duitsland, Frankrijk en Nederland. In België zijn de inspanningen om geothermie te ontwikkelen tot nu toe beperkt gebleven. Het best bekend is een reeks proefboringen die in de vroege jaren tachtig werd

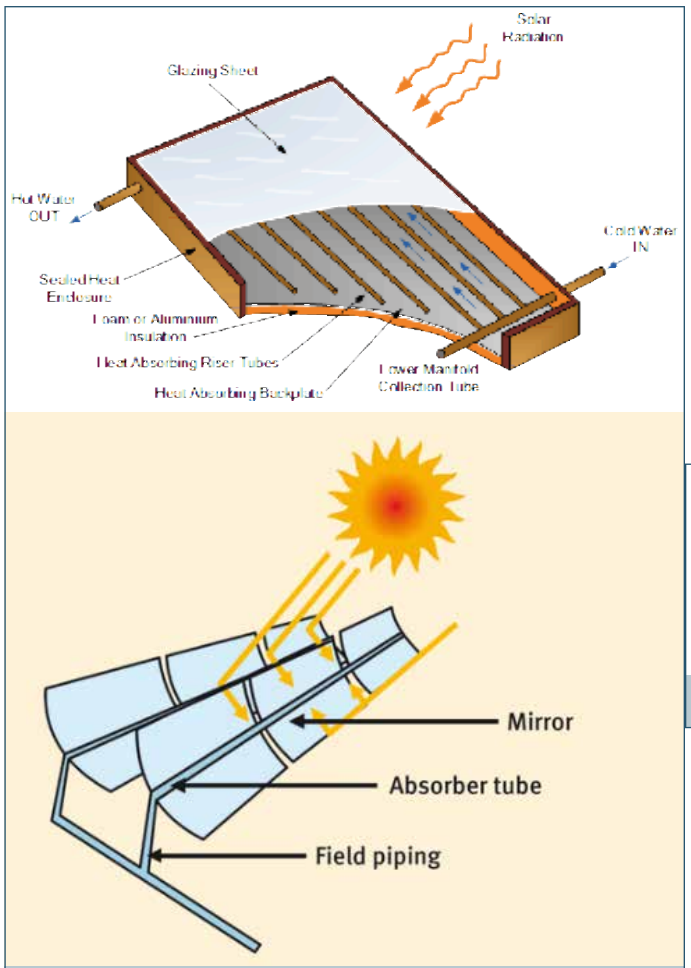
uitgevoerd in de Kempen en in de regio rond Bergen. Door de daling van de olieprijs in de tweede helft van het decennium, zijn de eerste inspanningen echter niet voortgezet. Alleen in de omgeving van Bergen is nog altijd een geothermisch systeem actief dat een aantal huizen, scholen, een sportcomplex en serres voorziet van warmte. Op kleine schaal werd al in 1957 gebruikgemaakt van aardwarmte, voor de verwarming van het voormalige zwembad van Turnhout.

In Vlaanderen ontwikkelt en test VITO een eerste diepe geothermiecentrale, de Balmattcentrale. Hier werden 3 boringen geplaatst tussen 2015 en 2018 tot op een diepte van 3,5 en 4,2 kilometer. Er wordt beneden in het boorgat een temperatuur van 140 °C gemeten, wat overeenkomt met een lokale geothermische gradiënt van 32,5 °C/km bij een gemiddelde jaartemperatuur van 10 °C. Het water bereikt de oppervlakte bij 128 °C. De eerste 2 boringen doorsneden voldoende doorlatende zones in een kalksteenlaag ('Dinatiaan') waar het water kan worden uit opgepompt en geïnjecteerd. Het doublet zal 5 tot 8 MWth leveren. In eerste instantie zal de aardwarmte aangewend worden om VITO en een aantal aanpalende bedrijven te voorzien van warmte. Janssen Pharmaceutica startte eind 2019 met het boren van een geothermisch doublet op zijn site in Beerse. De gewonnen energie zal via een warmtenet de bedrijfsgebouwen en -processen voorzien van warmte en koeling. Janssen Pharmaceutica hoopt daarmee zijn CO_2-uitstoot met 30 procent te verminderen. Er wordt op deze locatie gemikt op een reservoir op 2500 meter diepte en 85 °C.

Zonne-energie

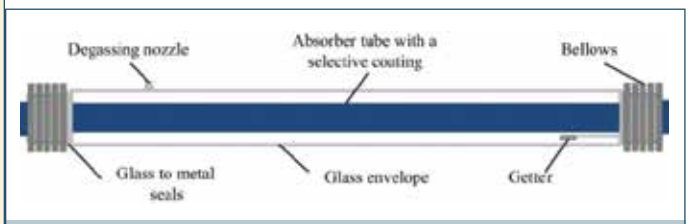
Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Michel De Paepe[1]

Al sinds de jaren tachtig is men in staat om op grote schaal stoom te genereren door het gebruik van zonne-energie. De zon levert energie door middel van straling, gaande van ultraviolet naar zichtbaar licht tot infrarood licht. Een zonne-installatie probeert door middel van coatings het gehele beschikbare spectrum te absorberen en om te zetten naar warmte. We onderscheiden twee types aan zonnethermische installaties : zogenoemde flat plate solar collectors enerzijds en concentrated solar thermal energy (CST) anderzijds.



Figuur 18 : Concentrated solar thermal energy-installatie van parabolische vorm [25], [26]

Bij het flat plate-ontwerp lopen buizen, meestal gevuld met water, door een vlakke zonnecollector. Bij CST concentreren een reeks parabolische spiegels de invallende zonnestraling op een collectorbuis. Doordat de straling geconcentreerd wordt, kan die collectorbuis opwarmen tot temperaturen boven de 400 °C [21]. Die hoogwaardige thermische energie kan dan, al dan niet rechtstreeks, worden aangewend om stoom te produceren. De hogere temperaturen alsook de lagere warmteverliezen door de kleinere oppervlakte zorgen ervoor dat CST-installaties beter geschikt zijn voor industriële stoomopwekking dan flat plate collectors. Om stoom te genereren kan men ofwel water door de collectorbuis laten lopen en zo direct stoom genereren (DSG) of men kan een thermische olie gebruiken als intermediaire warmtedrager.



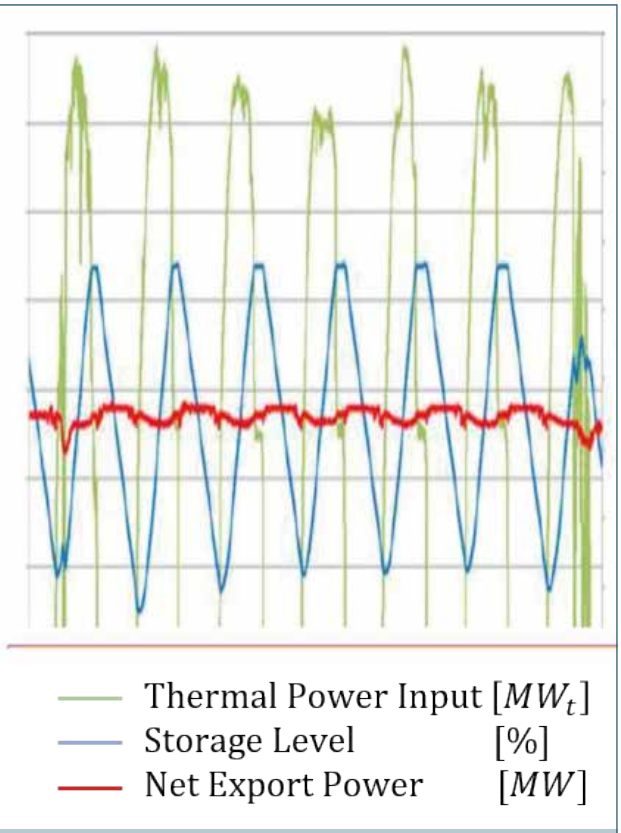
Figuur 19 : Collectorbuis met vacuümzone

Om de warmteverliezen in de collectorbuis te minimaliseren bestaat de buis meestal uit twee concentrische buizen. Rondom de buis met de warmtedragende vloeistof wordt een tweede buis geplaatst, vervaardigd uit glas. De ruimte tussen de twee buizen wordt vacuümgetrokken waardoor de warmteoverdracht door conductie en convectie wordt tegengegaan.

De voor de hand liggende vraag is natuurlijk of stoomgeneratie op basis van zonne-energie ook in België rendabel kan zijn. In België is de directe zonne-instraling per vierkante meter gemiddeld 950 kWh op jaarbasis. De spiegels kunnen gemiddeld 76% van de zonnestraling effectief opvangen (optisch rendement). De opgevangen zonnestraling wordt, bij een werkingstemperatuur van 340 °C, omgezet met een thermisch rendement van ongeveer 68%. In de praktijk kan men in België dus rekenen op een 450 à 550 kWh aan thermische energie per vierkante meter aan zonne-instraling op jaarbasis (ter referentie : PV-panelen leveren 150 – 200 kWhe per m^2). Een hectare spiegeloppervlakte levert, gedurende het jaar, dus energie voor de productie van ongeveer 7000 ton stoom.

Het is wel duidelijk dat als we een relatief grote hoeveelheid stoom wensen te produceren, een groot oppervlak aan spiegels vereist is. Dat zorgt ervoor dat de investeringskosten in CST vrij groot zijn. De operationele kosten zijn wel zeer laag en bestaan bijna volledig uit onderhoudskosten. Als de installatie relatief goed wordt onderhouden, kan ze makkelijk 25 jaar stoom leveren zonder rendementsverlies. Belangrijk is bijvoorbeeld dat de spiegels jaarlijks schoongemaakt worden, aangezien vuilafzetting op de spiegels een significant effect heeft op de totale efficiëntie van het systeem.

Natuurlijk is de zonne-instraling niet constant en zal ze sterk variëren in de loop van de dag, van dag tot dag en gedurende het jaar. Om de zonnestraling in de loop van de dag optimaal op te vangen en ook om een hoog optisch rendement te behalen, worden de spiegels veelal aangedreven om de zon te volgen. Variaties op korte termijn kunnen makkelijk worden opgevangen door buffertanks en met de hulp van thermische opslag. Op die manier is het mogelijk om de klok rond stoom te produceren met zonne-energie. In principe is het ook mogelijk om met langdurige thermische opslag in grote, geïsoleerde tanks de seizoensvariatie gedeeltelijk te overbruggen. Ten slotte kan men natuurlijk ook een stoomketel op biobrandstof of aardgas bijplaatsen om de tekorten aan te vullen.



Figuur 20 : De directe normale zonne-instraling in België (links) [27] en evolutie van opgevangen en opgeslagen vermogen (rechts) [28]

Om aan te tonen dat een CST-installatie ook in België rendabel kan zijn, worden in wat volgt nog twee 'proof of concept'-projecten besproken.

In België staan er op dit moment al enkele industriële CST-installaties:

Het chemisch-logistieke bedrijf Antwerp Distribution and Product Operations (ADPO) plaatste in 2019 als eerste van België een CST-installatie. In totaal werden 16 paraboolspiegels geplaatst boven een spoorweg, goed voor een oppervlakte van 1100 vierkante meter. De CST-installatie produceert nu per jaar 500 MWhth aan energie die voordien door een klassieke stoomketel

werd geleverd. De CST-installatie genereert stoom op 140 °C die gebruikt wordt om chemische producten op te warmen voor transport.

Ook bij het chemische bedrijf Proviron, gevestigd in de haven van Oostende, werd in 2019 een CST-installatie geplaatst. Ook daar werd voor 1100 vierkante meter aan paraboolspiegels geplaatst, opnieuw goed voor een jaarlijkse productie van ongeveer 500 MWhth. In de CST-installatie van Proviron wordt een thermische olie verwarmd tot 380 °C. Vervolgens wordt de thermische energie gebruikt om stoom te produceren op 10 bar en 180 °C in een stoomgenerator.

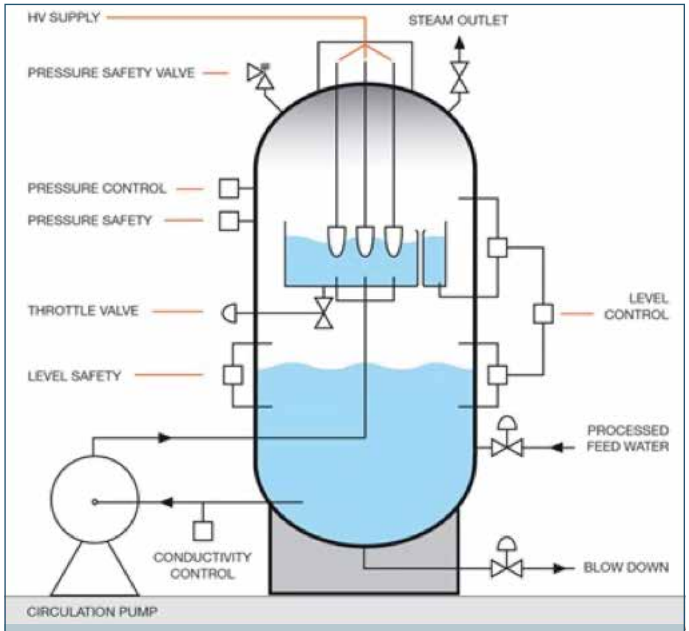
Figuur 21 : CST-installatie van ADPO (links) en van Proviron (rechts) [29]

Stoomgeneratie met elektriciteit

Elektrische stoomgeneratoren

Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Michel De Paepe[1]

Met de stijgende beschikbaarheid van hernieuwbare energie, worden ook elektrische boilers een mogelijk alternatief. Elektrische boilers voor industriële toepassingen maken typisch gebruik van hoogspanningselektrodes die in een waterbad worden geplaatst. Het water zelf dient dan als geleider tussen die elektrodes. De elektrische energie wordt vervolgens door de elektrische weerstand van het water volledig omgezet in warmte. Op die manier kunnen nieuwe ketels tot 90 ton stoom per uur produceren met een werkingsdruk tot ongeveer 34 bar [30], [31].



Figuur 22 : Elektrodestoomketel [31]

Elektrische stoomketels hebben een bijzonder hoog rendement van nabij de 99,9%. De energieomzetting van elektrische naar thermische energie gebeurt namelijk met een efficiëntie van 100%. Het enige energieverlies binnen de installatie is ten gevolge van het warmteverlies naar de omgeving. Dat warmteverlies is bovendien lager dan bij een klassieke ketel omdat er door een afwezigheid van verbranding geen componenten op echt hoge temperatuur staan. Dat zorgt er verder voor dat de thermische spanningen in een elektrische ketel lager zijn dan die bij een klassieke ketel.

Elektrische stoomketels hebben nog enkele andere voordelen. Zo zijn ze compact, stil en makkelijk te plaatsen, de meeste elektrische boilers kunnen direct worden aangesloten op het middenspanningsnet. Elektrische stoomketels zijn ook makkelijk te regelen en bijzonder responsief; vermogensregeling is bijna ogenblikkelijk en opstarten van koude omstandigheden tot volledige belasting duurt meestal maar enkele minuten. Ten slotte zijn deze stoomketels ook zelfregulerend, aangezien het water zelf de stroom geleidt tussen de elektrodes. Want als het waterpeil zakt, wordt de elektrische stroom belemmerd.

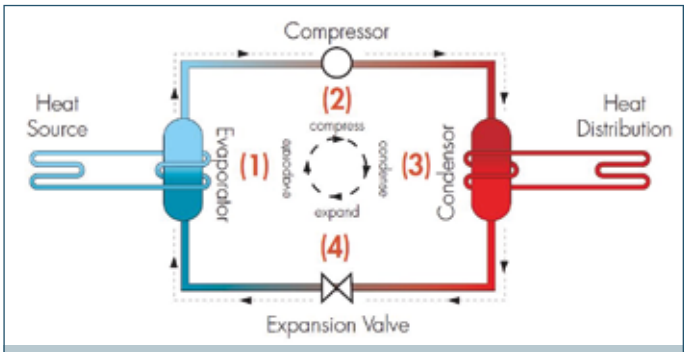
Het is wel belangrijk te benadrukken dat deze stoomketels alleen een milieuvriendelijk alternatief zijn indien er groene stroom wordt gebruikt. Als de gebruikte elektriciteit afkomstig is van een klassieke elektriciteitscentrale, is er netto meer vervuiling. Maar omdat naast zonne-energie ook wind of kernenergie gebruikt kan worden, is de beschikbaarheid van elektrische ketels veel hoger dan andere alternatieven die gebruikmaken van hernieuwbare energie zoals bijvoorbeeld zonneboilers.

Er zijn natuurlijk wel enkele nadelen verbonden aan het gebruik van elektrische boilers. Indien men een significante hoeveelheid stoom elektrisch wenst te produceren via toevoer van het net, kan de benodigde netaansluiting oplopen. Een ander nadeel van elektrische ketels is dat er een gevaar op elektrocutie ontstaat als er onvoldoende veiligheidsmaatregelen worden getroffen. Tot slot zijn de operationele kosten van een elektrische ketel over het algemeen hoger dan die van een klassieke stoomketel op aardgas door de relatief hoge elektriciteitsprijs. Het is wel mogelijk om de operationele kosten te verlagen door in te spelen op de lagere elektriciteitstarieven tijdens overaanbod of 's nachts. Het kan bijvoorbeeld ook interessant zijn om een elektrische ketel te plaatsen die alleen aanslaat als de elektriciteitsprijs lager is dan de prijs van aardgas plus de CO_2-emissietaks. Ook bij eigen elektriciteitsproductie kan een elektrische stoomketel interessant zijn. Bij een lokaal overaanbod aan elektriciteit is elektrische stoomproductie waarschijnlijk voordeliger dan injectie op het net.
Omdat elektrische boilers op zich geen nieuw concept zijn, zijn ze betrouwbaar en relatief makkelijk verkrijgbaar.

Hogetemperatuurwarmtepomp

Auteurs : Jasper Nonneman[1], Thomas Schoonjans[1], Judith Vander Heyde[1], Erik Verdeyen[4], Michel De Paepe[1]

Een warmtepomp is een thermische machine die laagwaardige warmte 'oppompt' naar hoogwaardige energie. Dat gebeurt gewoonlijk aan de hand van de cyclus beschreven in figuur 23. Een koelmiddel absorbeert de laagwaardige warmte in de verdamper ('evaporator') en wordt vervolgens mechanisch gecomprimeerd naar een hogere druk en temperatuur door een compressor. In de condensor komt de geabsorbeerde warmte dan weer vrij met een verhoogde temperatuur. Ten slotte wordt het koelmiddel door een expansieventiel geleid en is de cyclus rond. Standaardwarmtepompen halen in de condensor geen



Figuur 23 : Cyclus van een mechanische warmtepomp [32]

temperaturen die hoog genoeg zijn om stoom te produceren. De hogetemperatuurwarmtepomp is een variant die wel in staat is om temperaturen te halen die hoog genoeg zijn voor stoomproductie.

Een warmtepomp vereist dus twee vormen van energie-input : elektrische energie naar de compressor en laagwaardige warmte voor de verdamper. De warmte voor de verdamper wordt altijd vrij verkregen. Bij een klassieke lagetemperatuurwarmtepomp wordt warmte onttrokken aan de atmosfeer. Bij een hogetemperatuurwarmtepomp is de temperatuur van de lucht te laag en wordt restwarmte van rond de 100 °C gebruikt [33], [34]. Binnen de procesindustrie is laagwaardige warmte bijzonder makkelijk en kosteloos te verkrijgen. Want alle warmte die wordt toegevoegd aan een proces komt per definitie – aangezien ze niet is omgezet in een andere vorm – opnieuw vrij, maar met een lagere energetische waarde.

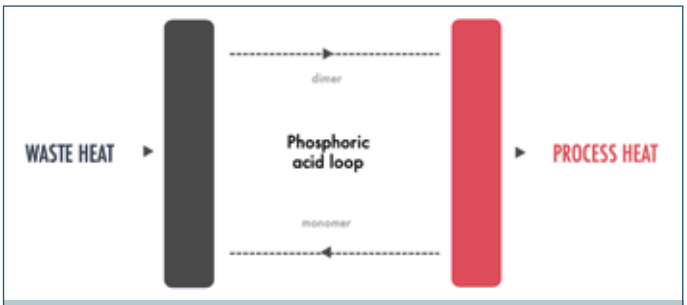
De efficiëntie van een warmtepomp wordt aangeduid aan de hand van een coefficient of performance of COP. De COP van een klassieke warmtepomp kan worden gedefinieerd als het thermische vermogen dat de condensor levert ten opzichte van de arbeid die is verricht door de compressor. Het spreekt trouwens voor zichzelf dat bij voorkeur groene stroom wordt gebruikt om de compressor te voeden.

$$\text{COP} = \frac{\text{High Temperature Heat}}{\text{Electrical Energy}}$$

Moderne hogetemperatuurwarmtepompen hebben een COP van bij de 2 tot 6, afhankelijk van het werkingsgebied en de temperatuurslift [33]. Hogetemperatuurwarmtepompen hebben een lagere COP, maar door verdere ontwikkelingen en optimalisatie neemt de COP steeds verder toe.

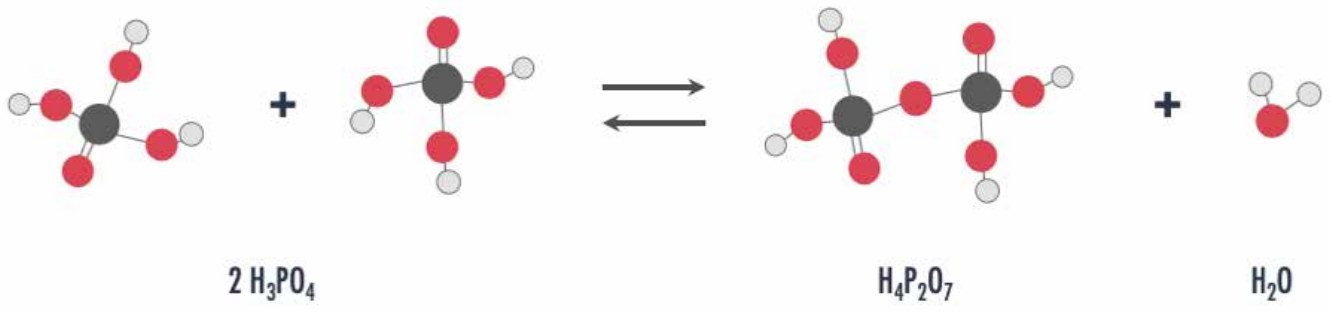
Bestaande warmtepomptechnologieën voor hoge temperatuur worden in de procesindustrie maar zeer beperkt toegepast, aangezien ze vaak technisch en/of economisch nog ontoereikend zijn. De laatste jaren is er wel veel vooruitgang geboekt. Zo zijn er nu al enkele bedrijven die hogetemperatuurwarmtepompen op de markt met temperaturen tot 150 °C en vermogens tot 4 MWth. Door middel van stoomcompressie is het mogelijk om nog iets hogere temperaturen te bereiken, tot 165 °C [33]. Die temperaturen en vermogens zijn voor veel toepassingen nog ontoereikend, maar verder onderzoek is gaande.

Een mogelijk alternatief voor de klassieke mechanische warmtepomp is de technologie van het Antwerpse start-upbedrijf Qpinch [35]. Zij ontwikkelden een warmtepomp met een alternatieve cyclus zonder mechanische compressie.



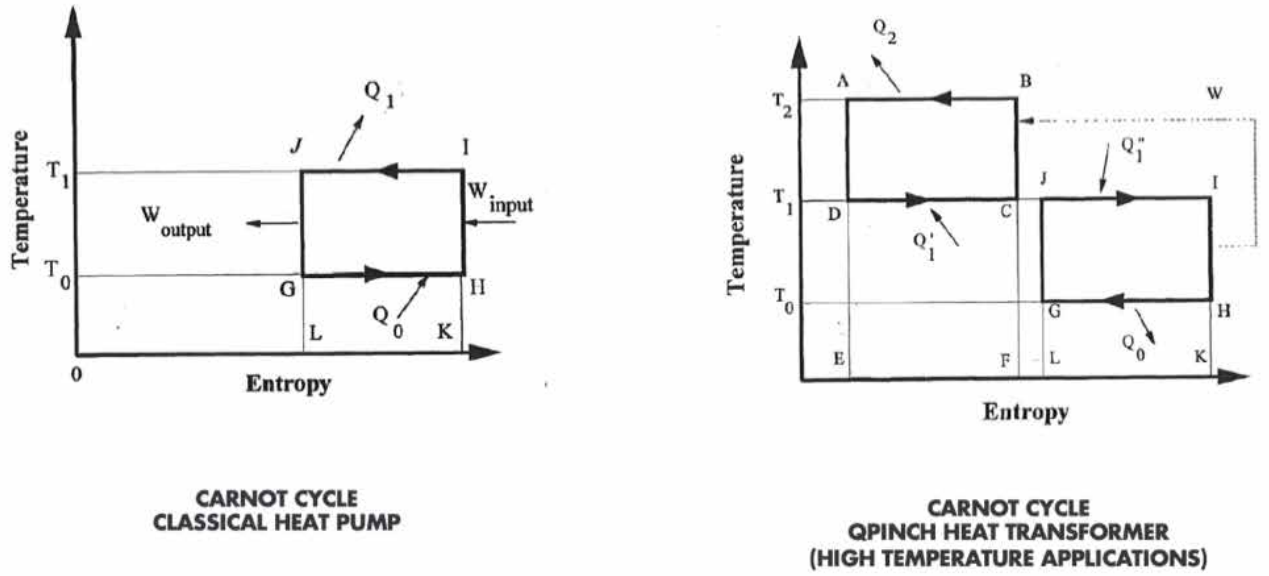
Figuur 24 :Vereenvoudigde werking van een Qpinch-warmtetransformator [35]

In die warmtepomp loopt fosforzuur (PA) in een gesloten kring tussen twee reactoren. In de zogenoemde koude reactor, die in het zwart is afgebeeld op figuur 24, wordt het fosforzuur onrechtstreeks in contact gebracht met de restwarmte. Daardoor ontstaat een chemische reactie waarbij water vrijkomt en waarbij het fosforzuur wordt omgezet in een langere molecule (figuur 23). Die reactie is endothermisch en vereist dus een input van energie. De reactor gebruikt daarvoor restwarmte en bijgevolg koelt de reststroom af. Het fosforzuur wordt vervolgens overgepompt naar de warme reactor, die in het rood is afgebeeld in figuur 24. In de warme reactor treedt de omgekeerde reactie op. Die reactie is exotherm, de opgeslagen chemische energie wordt weer vrijgemaakt als warmte. Bij een correct ontwerp komt de warmte van deze exotherme reactie op veel hogere temperatuur dan die van de restwarmte vrij. Die warmte kan dus opnieuw worden gebruikt als proceswarmte, bijvoorbeeld voor stoomproductie.



Figuur 25 : De omkeerbare chemische reactie met fosforzuur die gebruikt wordt om warmte te capteren en opnieuw vrij te geven [36]

In tegenstelling tot de klassieke warmtepomp die gebruikmaakt van mechanische compressie, maakt deze warmtetransformator dus gebruik van een soort thermische compressie. De cyclus die in deze warmtetransformator wordt doorlopen, is afgebeeld in figuur 26.



Figuur 26 : Cyclus van een klassieke warmtepomp en Qpinch-warmteomvormer in het T-s-diagram

Een warmtetransformator levert circa 50% van het opgenomen restwarmtevermogen terug als proceswarmte [36]. Het elektriciteitsverbruik is circa 3%, berekend op de output. Een concreet voorbeeld : 10 MW restwarmte kan worden omgezet in 5 MW processtoom met een elektrisch vermogen van circa 150 kW. In tegenstelling tot een klassieke warmtepomp wordt hier de helft van de restwarmte gebruikt om het proces aan te drijven en dus geen elektrische energie zoals bij vele andere warmtepompen. De unit is in staat om van de 100% energie die nu verloren gaat met hoge temperatuur, de helft terug te winnen, met een kleine input van elektriciteit.

De huidige generatie van warmtetransformatoren kan restwarmte afkoelen tot circa 80 °C. De maximale bewezen uitgangstemperatuur en druk van de proceswarmte is respectievelijk 220 °C en 18 bar (gauge) [36]. De haalbare temperatuurstijging is functie van de temperatuur waarbij de restwarmte vrijkomt en tot waar ze afgekoeld wordt. In de nabije toekomst hoopt men, door hoogtechnologische materialen te implementeren, een uitgangstemperatuur te halen van 250 °C met een maximumdruk van 25 bar (gauge) [36].

De eerste units van de Qpinch-warmtetransformator zijn momenteel in aanbouw en zullen tegen eind 2020 / begin 2021 in bedrijf worden gesteld. Bij Borealis in Zwijndrecht wordt een unit van 1,5 MW geïmplementeerd die gebruikmaakt van exotherme warmte op lage temperatuur. Elders wordt ook een unit van 1,3 MW geïmplementeerd op een destillatiekolom. Andere units zitten momenteel nog in de engineeringfase en zullen in 2021 of 2022 operationeel worden. Alle units zullen stoom produceren.

Conclusie

Vergelijkende tabel technologieën voor productie van industriële warmte				
technologie voor productie van industriële warmte	maximum saturatie druk (barg)	maximum capapciteit (ton/h)	TRL	opmerking
fossiel : vlampijpketel	30	30	9	
fossiel : waterpijpketel	40	1800	9	*
biomassa / afval (industrieel)	40	110	9	*
geothermie	2	12	6	**
zonne-energie	120	0,8 per ha	7	***
elektrische stoomketel	34	90	9	
HT warmtepomp : mechanisch	2,5	6	5	
HT warmtepomp : absorptie	18	7	7	

* : hogere waarden voor druk en capaciteit mogelijk voor elektrciteitsproductie
** : huidige grootste project in België
*** : in België 7000 ton per hectare per jaar

Referenties

[ ]		referentie	beschikbaar online	opgevraagd
1	VITO	"Warmtekrachtkoppeling", 2020	Warmtekrachtkoppeling	oktober 2020
2	Spirax Sarco	"The Boiler House: Water Tube Boilers," 2020	Water Tube Boilers	oktober 2020
3	Viessmann	persoonlijke communicatie ; Vlampijpketels	-	-
4	Spirax Sarco	"The Boiler House: boiler efficiency and combustion," 2020	Boiler Efficiency and Combusion	oktober 2020
5	De Kleijn	"Werking Ketelhuis," 2017.	Werking Ketelhuis	oktober 2020
6	Energy Technology Systems Analysis Program	"Industrial Combustion Boilers," 2010	-	-
7	M. De Paepe	Presentatie Stoomcursus, 2020	-	-
8	M. Van Belleghem	Presentatie Stoomcursus, 2020	-	-
9	Viessmann	"Waste heat boilers," 2020	Waste Heat Boilers	november 2020
10	Wikipedia	Heat recovery steam generator"	Heat Recovery Steam Generator	oktober 2020
11	J. Blondeau	persoonlijke communicatie ; Sustainable Biomass	-	-
12	Gaya	"Turning dry biomass into green gas", 2014	Turning Dry Biomass into Green Gas	oktober 2020
13	Bob Vandedrinck (Vyncke)	Stoomtechniekdag 2019 - "Next generation bio-fueled energy plants for the industry", 2019	-	-
14	Bioenergy Europe	"Bioenergy essentials", 2019	-	-
15	Erbia Energy	"Pellets contra el camboi climatico ?", 2020	Pellets contra el camboi climatico ?	oktober 2020
16	M. Yugo en A. Soler	"A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030-2050)", 2019	-	-
17	C. Malins	"What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future", 2017	-	-
18	Dena	"E-Fuels Study: The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU", 2017	-	-
19	Carbon Engineering	"Our Technology", 2020	Our Technology	november 2020
20	ClimeWorks	"Climeworks", 2020	Climeworks	november 2020
21	Vyncke	"Wereldpremière voor CO_2-afvang op een biomassa ketel voor de glastuinbouw" ; StoomAtlas	-	-
22	North CCU HUB	"North-C-Methanol"	North-C-Methanol	oktober 2020
23	Port of Antwerp	"Newsroom: Port of Antwerp brengt verschillende spelers samen voor productie duurzame methanol", 2019	Newsroom Port of Antwerp	oktober 2020
24	M. Van Belleghem	"Waterstof als duurzame brandstof voor stoomketels" ;StoomAtlas.	-	-
25	ECOhome	"All About solar thermal collectors", 2020	All About Solar Thermal Collectors	november 2020
26	BINE information center	"Parabolic through collector technology"	Parabolic through Collector Technology	november 2020
27	Solargis	"Maps and GIS data"	Maps and GIS Data	november 2020
28	Koen Vermout (AZTEQ)	persoonlijke communicatie ; Geconcentreerd zonlicht voor proceswarmte, 2019	-	-
29	AZTEQ	"AZTEQ for companies", 2020	AZTEQ for Companies	november 2020
30	-	Cleaver Brooks, ELectrode Boiler Catalog	-	-
31	PARAT	"High Voltage Electrode boiler for Steam and Hot water"	High Voltage Electrode Boiler	oktober 2020
32	European Commission	"A high-efficiency energy storage system that captures energy generated from renewable sources, waste energy from industry, and solar radiation, in a compressed fluid and heat pump hybrid system", 2016	A High-efficiency Energy Storage System	oktober 2020
33	M. De Paepe en S. Lecompte	"cSBO proposal : HP4Steam", 2020	-	-
34	Norbert Wenn (Siemens AG)	"Heat pumps for district heating and process heat", 2019	-	-
35	QPinch	"QPinch - Heat Transformer", 2020	QPinch - Heat Transformer	november 2020
36	E. Verdeyen en U. Hoornaert	"De QPinch heat transformer: Concept, technologische status, marktpenetratie en bijdrage aan de netto-nuluit-stootdoelstellingen van de industrie", 2020	-	-
37	US Department of Energy	Improve the efficiency of your steam boiler	-	-
38	SEAI	"Biomass Boilers- Technology guide", 2019	-	-
39	Science Direct	"Heat Recovery Steam Generation", 2020	Heat Recovery Steam Generation	november 2020
40	Bosch	"Universal heat recovery steam boiler", 2020	Universal Heat Recovery Steam Boiler	november 2020
41	Forest Research	"Potential yields of biofuels per ha p.a.", 2020	Potential Yields of Biofuels per ha p.a.	oktober 2020
42	HKB Boiler Solutions	"Afgassenketel", 2020	Afgassenketel	november 2020
43	Wikipedia	"Electrode Boiler", 2020	Electrode Boiler	oktober 2020