

CO₂-neutrale stoomproductie in industriële applicaties

ZONNE-ENERGIE - THERMISCHE OPSLAG -
WATERSTOF - E-FUELS - ELEKTRISCHE BOILERS -
DAMP COMPRESSIE WARMTEPOMPEN -
HEAT TRANSFORMERS - BIOBRANDSTOFFEN



Inhoud

ZONNE-ENERGIE EN THERMISCHE OPSLAG	3
VLAKKE-PLAAT ZONNECOLLECTOREN	3
CONCENTRATED SOLAR THERMAL ENERGY	4
THERMISCHE OPSLAG	5
WATERSTOF EN E-FUELS	6
WATERSTOF	6
E-FUELS	8
ELEKTRISCHE BOILERS	10
BIOBRANDSTOFFEN	11
BIOMASSA-STOOMKETELS	13
DAMP COMPRESSIE EN HEAT TRANSFORMER	14
DAMP COMPRESSIE WARMTEPOMPEN	14
MECHANISCHE DAMP RECOMPRESSIE	17
HEAT TRANSFORMER	18

Fossiele brandstoffen zijn tot op vandaag nog steeds de belangrijkste energiebron voor stoomproductie (en bij uitbreiding warmteproductie). In de nabije toekomst moet de overgang worden gemaakt naar CO₂-neutrale alternatieven. Maar hoe kunnen we die overgang maken en wat zijn de mogelijkheden?

Voorafgaand aan deze brochure werd op 1 maart 2023 reeds een discussie georganiseerd door het Platform voor Duurzaam Stoomgebruik, waar experts uit de industrie, uit de onderzoeksector en vanuit het beleid/de overheid in discussie gingen om de huidige problemen met deze overgang naar hernieuwbare technologieën aan te kaarten en te brainstormen over oplossingen. Ook de toekomst van de stoomindustrie werd besproken: het wordt verwacht dat de stoomvraag in de toekomst zal afnemen door directe elektrificatie van de warmtevraag (zie ook de paper van Madeddu et al¹). De Stoomtechniekdag staat ook in het thema van alternatieve warmteproductie. Experts uit verschillende velden spreken en gaan in discussie tijdens een interactief panel gesprek.

Deze studie geeft een overzicht van de beschikbare, CO₂-neutrale alternatieven en wil daarmee vooral industriële spelers informeren naar de verschillende mogelijkheden en de huidige stand van zaken qua ontwikkeling, rendabiliteit... van de verschillende technologieën. Hierbij worden ook enkele specifieke case studies vanuit de (voornamelijk Belgische) industrie besproken.

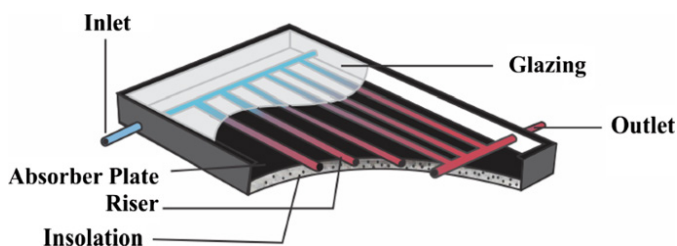
¹ Azteq, Duurzame en efficiënte oplossingen, dat is de kracht van onze expertise: <https://azteq.be/nl/hoe-werkt-het/>

ZONNE-ENERGIE EN THERMISCHE OPSLAG

Thermische zonne-energie is een geschikte, duurzame energiebron voor industriële processen waar hoogwaardige warmte tot 400°C wordt gebruikt. Typisch wordt er onderscheid gemaakt tussen twee technologieën: zonnecollectoren en installaties waar gebruik wordt gemaakt van geconcentreerd zonlicht. Aangezien zonne-energie niet altijd beschikbaar is, zijn thermische energie-opslagsystemen een zeer relevante en nuttige aanvulling voor deze installaties.

VLAKKE-PLAAT ZONNECOLLECTOREN

Zonnecollectoren (solar collectors) bestaan typisch uit een metalen box waarin buizen geplaatst zijn boven op een warmte-absorberende plaat.



Door de buizen stroomt een vloeistof die wordt opgewarmd door de zon. Aan de bovenzijde van de box is er een glazen wand. De andere wanden zijn vaak voorzien van isolatie om thermische verliezen te beperken. Zonnestraling gaat door de glazen wand en warmt de warmte-absorberende plaat op.

De plaat geleidt de warmte naar de buizen en zorgt voor een temperatuurstijging van de vloeistof. De absorberende plaat bestaat vaak uit een goed geleidend materiaal zoals aluminium of koper en is doorgaans voorzien van een speciale coating om zoveel mogelijk zonne-energie te absorberen.

Vlakke zonnecollectoren worden in België typisch gebruikt voor huishoudelijke toepassingen waarbij de zonnecollectoren op het dak geplaatst worden. Hierbij zijn de zonneboilers (zonnecollectoren+voorraadvat) altijd gekoppeld aan een alternatief verwarmingselement zoals bijvoorbeeld een klassieke verwarmingsketel, om steeds warm water te verzekeren.

Op industriële schaal zijn er in België momenteel nog geen toepassingen, maar dit is wel al het geval in andere landen.

CASE STUDY

Industriële zonnecollectoren-installatie in Verdun

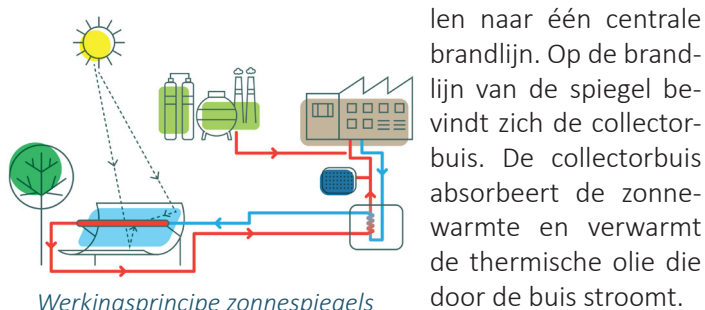
Het Finse bedrijf Savosolar is gespecialiseerd in zonnecollectoren voor industriële toepassingen op lage temperatuur (<100°C). Ze maken gebruik van speciaal ontworpen absorberende platen en hebben een eigen coating ontwikkeld. Typische sectoren die gebruik maken van warmte op lage temperatuur zijn de voedingsindustrie, brouwerijen...

In Verdun (Frankrijk) is in 2022 een zonnecollectoreninstallatie van ongeveer 10 MW geïnstalleerd door Savosolar, om warm water te voorzien voor Lactalis (voedingsindustrie). De installatie bestaat uit 930 collectoren die goed zijn voor zo'n 8000 MWh per jaar. Met een oppervlakte van bijna 15000 m² is het de grootste zonnecollectoreninstallatie van Europa.

De collectoren verwarmen water tot 80°C in de zomer en 25°C in de winter. De zonne-installatie is aangevuld met een bufferopslagvat van 6000 m³, om de fabriek zo lang mogelijk van warm water te voorzien. Voor de toepassing (het produceren van weipoeder in een weidroogtoeren) is echter een temperatuur van 160°C nodig. Het water moet dus nog verder opgewarmd worden met fossiele brandstoffen, maar dankzij het voorverwarmen in de zonnecollectoren kan jaarlijks 11% bespaard worden op gas en wordt 20% minder CO₂ uitgestoten bij het volledige proces.

CONCENTRATED SOLAR THERMAL ENERGY

Ook Concentrated Solar Thermal (CST) Energy kan hoogwaardige warmte opwekken voor industriële processen. De figuur¹ toont een schematisch overzicht van een CST-installatie. Parabolische spiegels concentreren de zonnestralen naar één centrale



De warme, thermische olie vloeit naar een warmtewisselaar waar de olie warmte afgeeft aan een medium geschikt voor de beschouwde industriële toepassing, bijvoorbeeld stoom, olie, water of lucht. Om warmteverliezen te beperken is er vaak een vacuümzone voorzien rond de collectorbuis. De parabolische spiegels zijn vaak ook voorzien van een rotatiesysteem, zodat ze kunnen opgesteld worden in de positie waarin optimaal van de zonne-energie gebruik kan worden gemaakt. In plaats de zon te leiden op één lijn, bestaan ook systemen waar de zonnestralen op één punt geconcentreerd worden.

Met CST kan thermische warmte tot 400°C opgewekt worden, zelfs met het Belgische klimaat. In België wordt dagelijks gemiddeld tussen de 2700 en 3060 Wh/m² gemeten aan globale zonnestraling, afhankelijk van de locatie. Zo is het doorgaans aan de kust minder bewolkt, waardoor hier de hoogste waarden van België worden opgemeten. De spiegels kunnen gemiddeld 76% van de zonnestraling opvangen en hebben een rendement van ongeveer 68% (bij een werkingstemperatuur van 340°C). Dit komt neer op ongeveer 510 – 580 kWh/m² aan thermische energie op jaarbasis.

Om stoom op industriële schaal te produceren (of algemener: warmte te voorzien), is bij deze technologie een groot grondoppervlak nodig om de spiegels te plaatsen, met als gevolg hoge investeringskosten. De operationele kosten zijn echter zeer beperkt en een installatie kan makkelijk 25 jaar in operatie zijn bij goed onderhoud, bijvoorbeeld door het regelmatig schoonmaken van de spiegels. Bijkomend nadeel is natuurlijk ook de variërende zonnestraling. Een CST-installatie kan aangevuld worden met een thermisch opslagsysteem als buffer (zie verder), ook kan de installatie gecombineerd worden met een ander type ketel (klassieke stoomketel, stoomketel op biomassa, e-boiler...).

¹ Azteq, Duurzame en efficiënte oplossingen, dat is de kracht van onze expertise: <https://azteq.be/nl/hoe-werkt-het/>

CASE STUDY

Azteq-installatie bij ADPO te Beveren

Azteq is een Belgisch bedrijf, gespecialiseerd in het ontwikkelen, installeren, opereren, onderhouden en financieren van CST-installaties om hoogwaardige warmte te leveren. Azteq plaatste in 2019 de eerste CST-installatie bij Antwerp Distribution and Product Operations (ADPO) in Beveren¹. Er werden 16 zonnespiegels geplaatst (totaal spiegeloppervlak van 1100 m²). Met de installatie wordt stoom op 140°C en 10 bar geleverd. De CST-installatie vervangt jaarlijks 500 MWh aan gasverbruik in een klassieke stoomketel en toont bijgevolg ook de mogelijkheden van CST in België aan.



Azteq-installatie bij ADPO

Naast de installatie in Antwerpen, zijn er ook Azteq-CST-installaties te vinden in Oostende en Genk. Samen genereren ze ongeveer 1300 MWh per jaar. Aangezien deze technologie relatief nieuw is, is er nog geen massaproductie mogelijk voor de zonnespiegels (in tegenstelling tot de klassieke zonnepanelen). Dit maakt de investeringskost momenteel nog hoog. De drie installaties hadden een totale kost van 1,4 miljoen euro, waarvan 819000 euro gesubsidieerd werd door de Vlaamse overheid (2019)².

¹ Stoomplatform, Stoom uit zonnestralen, 2023: www.energie.be/nieuws-detail.php?blog_id=34&page_platform_id=0&page_categroy_id=0&page_year=

² Azteq, Project ADPO: <https://azteq.be/project-adpo/>

THERMISCHE OPSLAG

Wanneer de warmte, geproduceerd met één van de eerder besproken technologieën, niet meteen ingezet hoeft te worden, kan een thermisch opslagsysteem ingezet worden om de tijd tussen het moment waarop duurzame warmte beschikbaar is en wanneer de warmte wordt gevraagd, te overbruggen. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld ook zonloze dagen overbrugd worden. Thermische opslag kan op verschillende manieren geïmplementeerd worden en kan voor verschillende tijdsschalen het verschil tussen vraag en aanbod compenseren.

VOELBARE THERMISCHE OPSLAG

Voor thermische seizoensopslag kan warmte (of koude) ondergronds worden opgeslagen in een vloeistof of vaste stof. Hierbij ondergaat het opslagmedium geen faseverandering en wordt dus gebruik gemaakt van de voelbare warmte-eigenschappen van het medium. Belangrijk bij thermische opslag is om steeds de warmteverliezen zoveel mogelijk te beperken. Gesmolten-zout installaties zijn hiervan het bekendste voorbeeld en worden al op grote schaal toegepast, vaak in combinatie met een concentrated solar power-installatie.

LATENTE THERMISCHE OPSLAG

Er kunnen ook faseveranderingsmaterialen (Phase Change Materials – PCMs) gebruikt worden. Tijdens het laden absorbeert het faseveranderingsmateriaal warmte, waardoor het van fase verandert (smelten). Hierbij wordt gebruik gemaakt van de latente energie van het materiaal, waardoor een grote hoeveelheid energie kan worden opgeslagen per volume. Tijdens het ontladen, stolt het materiaal en wordt de opgeslagen energie opnieuw vrijgegeven. Er bestaat een breed scala aan faseveranderingsmaterialen met een uitgebreid bereik aan materiaaleigenschappen, waardoor ze

voor veel toepassingen geschikt zijn. Latente thermische opslag systemen zitten momenteel grotendeels nog in de onderzoeksfase.

THERMOCHEMISCHE OPSLAG

Een derde manier is thermochemische opslag. Hierbij wordt energie opgeslagen door middel van reversibele chemische reacties. Een voorbeeld hiervan is een warmtebatterij waar warmte (uit bijvoorbeeld zonne-energie) wordt opgeslagen door vocht uit zout in een opslagtank te onttrekken. Tijdens het ontladen wordt het zout opnieuw met water in contact gebracht en komt warmte vrij.

Het grootste voordeel van deze opslagmethode is dat veel warmte kan worden opgeslagen in een klein volume. Eén kubieke meter droog zout bevat evenveel energie als 40 kubieke meter aardgas, of 3 à 4 kubieke meter water op 90°C¹. Dergelijke zoutbatterij is ontwikkeld door TNO en TU Eindhoven voor in de particuliere woningbouw. Ze verwachten de eerste toepassing in woningen in 2024. Hetzelfde concept kan ook toepast worden op grotere schaal door bijvoorbeeld gebruik te maken van zoutsilo's. Hier zijn momenteel nog geen toepassingen van te vinden.

¹ T. ten Brinck, Ook de Eindhovense zoutbatterij is niet de heilig warmte-graal, 2022
www.wattisduurzaam.nl/39434/energie-besparen/warmte-koude/ook-de-eindhovense-zoutbatterij-is-niet-de-heilige-warmte-graal/

CASE STUDY

Thermochemische opslag op industriële schaal

Het Zweedse bedrijf SaltX heeft op industriële schaal een thermochemisch opslagsysteem ontwikkeld en op de markt gebracht. Laden gebeurt met beschikbare, bij voorkeur hernieuwbare, energie. Een voorwaarde is wel dat een temperatuur van minstens 550°C gehaald wordt. Het SaltX-systeem combineren met de huidige beschikbare CST-installaties is dus niet mogelijk. Tijdens het ontladen wordt hoge temperatuur warmte tot 450°C vrijgegeven. De installatie kan tot 600 kWh aan energie opslaan. Op dit moment zijn enkele installaties in gebruik in Europa, in o.a. Berlijn en Stockholm¹.

¹ SaltX, SaltX Technology: www.saltxtechnology.com/

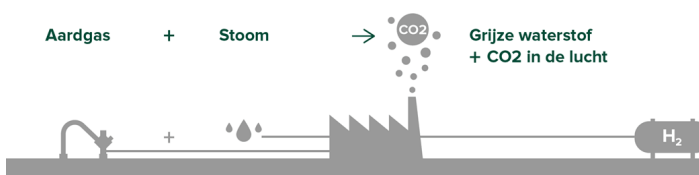
WATERSTOF EN E-FUELS

Waterstof kan geproduceerd worden op verschillende manieren. De twee bekendste methoden zijn door het kraken van aardgas ('steam reforming') of door elektrolyse van water. De eerste methode is uiteraard niet interessant wanneer gekeken wordt naar waterstof voor stoomproductie, aangezien stoom op hoge temperatuur nodig is om dit type waterstof te produceren en hiervoor een fossiele grondstof gebruikt wordt. Bij de tweede methode, i.e. elektrolyse, worden twee elektroden ondergedompeld in water waartussen een elektrische spanning wordt aangebracht. Waterstofgas komt zo vrij aan de kathode en zuurstofgas aan de anode. Deze waterstof kan dan verwerkt worden tot productie van een e-fuel (zie verder) of kan ook zelf rechtstreeks gebruikt worden als brandstof.

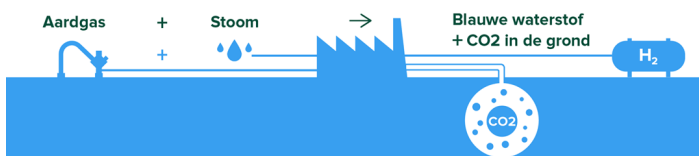
WATERSTOF

Afhankelijk van de herkomst van de energie of elektriciteit die gebruikt wordt in het productie proces, krijgt het waterstofgas een andere benaming (zie schematische voorstelling van het productieproces¹).

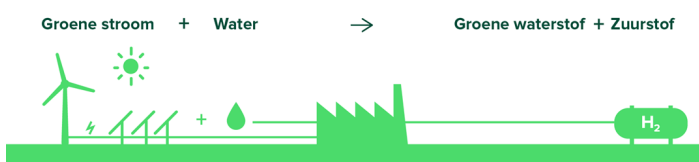
Grijze waterstof is de klassieke methode op basis van methaan (veel CO₂-uitstoot).



Blauwe waterstof wordt ook geproduceerd uit methaan, maar de CO₂ die geproduceerd wordt, wordt opgevangen en gestockeerd.



Groene waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse op basis van hernieuwbare elektriciteit².



Er zijn ook nog andere productiemogelijkheden voor waterstof. Deze zijn (voorlopig) minder courant: solar thermochemical water-splitting, photoelectrochemical of biologisch (via microben³).

Het grote voordeel van waterstof t.o.v. fossiele brandstof is dat het bij verbranding enkel water als product vormt (en NO_x). De verbranding is dus niet toxisch en er is geen CO₂-uitstoot, maar er kan uiteraard wel CO₂-uitstoot plaatsvinden tijdens productie⁴. Waterstof kan zowel als grondstof en als brandstof gebruikt worden. Verder is het, in theorie, ook makkelijk te stockeren (onder druk) en te transporteren (eventueel via het huidige aardgasnet)⁵. Over de praktische haalbaarheid valt uiteraard te discussiëren. Voor iedere specifieke toepassing moeten verschillende opties vergeleken worden.

Hoewel waterstof een hoge energiedensiteit heeft op basis van massa, heeft het een heel lage volumetrische energiedichtheid. Hierdoor geeft waterstofgas bij verbranding maar een derde van de energie (per volume) af in vergelijking met aardgas op dezelfde druk⁵. Het verbranden van pure waterstof kan ook voor moeilijkheden zorgen bij directe verbranding in ovens of verwarmingsinstallaties door zijn hoge ontvlambaarheid⁶. Momenteel wordt de grote meerderheid (95%) van het waterstof nog geproduceerd op basis van fossiele brandstoffen aangezien de productie van groene waterstof voorlopig nog te duur is⁷. Dit komt door de hoge elektriciteitskost (meer dan 70% van de productiekost), de loading factor van de productie plant (het gebruik van

1 Milieucentraal, Waterstof: www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/waterstof/

2 Wat is waterstof, Gasunie: www.gasunie.nl/expertise/waterstof/wat-is-waterstof [Geopend 2023 februari]

3 U.S. Department of Energy, Hydrogen Production, 2016

4 J. Cartwright, Hydrogen use doesn't emit carbon but its production often does. That could soon change, European Commission, 17 oktober 2018 <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/hydrogen-use-doesnt-emit-carbon-its-production-often-does-could-soon-change> [Geopend februari 2023]

5 Energik, Stoomatlas editie 3- deel 1, 2020

6 Concawe, Role of e-fuels in the European transport system- Literature review, 2020

de elektrolyser hangt samen met de beschikbaarheid van (fluctuerende) hernieuwbare energie), en de investerings- en operationele kosten⁷. De productiekosten gaan tot 0,7 euro/kWh in 2015, met een verwachte daling tot 0,11 euro/kWh tegen 2050, wanneer er vooral hernieuwbare energiebronnen gebruikt worden voor de elektriciteitsproductie⁶. Voorlopig wordt waterstof vooral gebruikt als grondstof in verschillende industriële processen, bijvoorbeeld voor het produceren van kunstmest en ammoniak. Waterstof is echter ook een energiedrager en kan in de industrie als pure brandstof gebruikt worden, of gemengd

worden met aardgas voor de verbranding in boilers. Wanneer pure waterstof verbrand wordt, dienen er wel aanpassingen te gebeuren aan het boiler design, zowel aan de ketel als de brander. Door de hogere vlamtemperaturen bij verbranding kan de ketel niet zomaar één-op-één omgebouwd worden. Het belang van condenserende ketels zal ook steeds meer en meer toenemen naarmate de concentratie waterstof in de brandstof toeneemt. In deze condenserende modus (warmte recupereren uit gevormde waterdamp) zijn de waterstof gestookte ketels namelijk het efficiëntst⁵.

7 A. Schnettler, At the Dawn of the Hydrogen Economy, Power, 1 juli 2020: www.powermag.com/at-the-dawn-of-the-hydrogen-economy/ [Geopend februari 2023]

CASE STUDY

Stoomketels op waterstof bij chemisch bedrijf Vynova (geproduceerd door Callens)

In het Belgisch chemisch bedrijf Vynova wordt waterstof geproduceerd als nevenproduct bij de productie van basischemicaliën voor gebruik in de bouwsector, waterzuivering, medische wereld, voedselindustrie en farmaceutische sector. Samen met Callens hebben ze een stoomketelsysteem ontworpen, aangedreven door waterstof. De stoom die zo geproduceerd wordt, wordt gebruikt in het productieproces voor verdere zuivering van de chemische producten. De brander heeft een capaciteit >20 MW en produceert tot 30 ton stoom per uur. Door de installatie van twee ketels verlaagt de CO₂-uitstoot met 10000 ton per jaar en kan twee derde van alle stoom opgewekt worden die op de site gebruikt wordt. De totale investering bedroeg meer dan 8 miljoen euro en de installatie werd in 2022 in gebruik genomen^{1,2}.

1 Vynova verlaagt CO₂-uitstoot in Tessenderlo met stoomketels op waterstof Vynova, 16 maart 2022 www.vynova-group.com/news-vynova-belgium/vynova-stoomketels-waterstof [Geopend februari 2023]

2 Vynova and Callens about to build a state-of-the-art hydrogen-powered steam boiler system, Callens, 1 juli 2021 www.callens.eu/en/news/vynova-and-callens-about-to-build-a-stateoftheart-hydrogenpowered-steam-boiler-system [Geopend februari 2023]

CASE STUDY

Hyoffwind, de eerste industriële waterstofcentrale van België

De omgevingsvergunning voor de eerste industriële waterstofcentrale van België, Hyoffwind in Zeebrugge, is binnen en de ambitie is om in 2024 de productie op te starten. In een eerste fase zal 25 MW aan groene elektriciteit, geproduceerd op zee, met een power-to-gasinstallatie omgezet worden in waterstofgas. In een tweede fase ligt de focus op een opschaling tot 100 MW. De waterstof die geproduceerd wordt, zal ingezet worden voor het aardgasnet, industriële gebruikers in binnen- en buitenland en voor het balanceren van het elektriciteitsnet. De jaarlijkse productie aan waterstof wordt geschat op 3500 tot 4000 ton¹.

1 W. Polspoel, Eerste Belgische groene waterstoffabriek krijgt omgevingsvergunning, Circubuild, 18 januari 2023 www.circubuild.be/nl/nieuws/eerste-belgische-groene-waterstoffabriek-krijgt-omgevingsvergunning/ [Geopend juni 2023]

E-FUELS

E-fuels zijn synthetisch geproduceerde brandstoffen, op basis van hernieuwbare elektriciteit, die dienen als drop-in alternatief voor fossiele brandstoffen. Enkele voorbeelden van e-fuels zijn e-methaan, e-methanol, e-DME, als ook vloeibare vormen zoals e-benzine en e-diesel. De basiscomponenten van een e-fuel bestaan uit CO₂, CO en groen waterstofgas. CO₂ kan worden opgevangen uit een geconcentreerde bron (bijvoorbeeld rookgassen op een industriële site) of uit de lucht (direct air capture, DAC¹). Bij DAC wordt CO₂ uit de lucht verwijderd via verschillende processen en vervolgens opgeslagen.

E-fuels hebben als grote voordeel dat ze CO₂ neutraal kunnen zijn. Dit is echter enkel het geval wanneer het opvangen CO₂ biogenisch is (bijvoorbeeld bij verbranden biomassa). De hoeveelheid uitgestoten CO₂ bij verbranding is dan in theorie niet hoger dan de CO₂ die aan het begin van het proces is toegevoegd. Bij fossiele CO₂ is dit niet het geval en wordt de CO₂ uiteindelijk toch uitgestoten bij verbranden van de e-fuel. Hier wordt echter wel het verbranden van 'extra' fossiele brandstof vermeden¹. De e-fuels hebben ook een hoge energiedichtheid (in vergelijking met elektrische batterijen²), wat hun gebruik voor transport over lange afstanden interessant maakt³. Verder zijn ze ook een drop-in replacement voor de klassieke brandstoffen. De nodige aanpassingen aan bestaande installaties zijn beperkt, en ze kunnen ook vermengd worden met fossiele brandstoffen³.

Nadelen van e-fuels zijn de hoge productiekosten, zeker in vergelijking met fossiele brandstoffen. Er wordt wel verwacht dat deze kosten in de toekomst zullen afnemen door schaalvoordelen, leereffecten en vermindering in de prijs van hernieuwbare elektriciteit. Hierdoor zou de huidige kostprijs van 7 euro/l dalen tot 1-3 euro/l (zonder belastingen) tegen 2050, maar dit is nog steeds één tot drie keer hoger dan de prijs van fossiele brandstoffen². De productie-efficiëntie van e-fuels ligt ook redelijk laag (40-50%) waardoor redelijk wat (hernieuwbare) energie nodig is om e-fuels te produceren¹.

E-fuels hebben een toepassing in elke sector, toch zal in de toekomst de focus vooral liggen op de transportsector². Het voordeel van het gebruik van e-fuels in wagens is dat het wagenpark vergroend kan worden zonder alle wagens te vervangen met elektrische. De huidige motoren en tankstations kunnen ook behouden blijven. Door het veel lagere rendement van wagens rijdend op e-fuels in vergelijking met elektrische wagens, is het interessanter om e-fuels in te zetten in sectoren waar er geen duurzaam alternatief is. Zo kunnen e-fuels wel een oplossing bieden in de luchtvaart en scheepsvaart, aangezien deze sectoren moeilijker te elektrificeren zijn (hogere energiedensiteit e-fuel versus batterij⁴).

In België is de TLR van productie en gebruik van e-fuels in industrie nog heel laag. Zo worden ze bijvoorbeeld nog niet gebruikt als brandstof voor (stoom)ketels¹.

1 V.i.e.e. klimaat, Stoomproductie in de energietransitie, 2021

2 Concawe, Role of e-fuels in the European transport system - Literature review, 2020

3 Focus op e-fuels: Wat zijn het, hoe worden ze gemaakt en wat kun je ermee, 17 september 2021
<https://informazout.be/nl/blog/focus-op-e-fuels-wat-zijn-het-hoe-worden-ze-gemaakt-en-wat-kun-je-ermee>

4 V. Merckx, Europees verbod op verbrandingsmotoren dreigt vast te lopen op "e-fuels": wat zijn die synthetische brandstoffen precies?, vrtnws, 13 maart 2023
www.vrtnws.nl/2023/03/13/europees-verbod-op-verbrandingsmotoren-dreigt-vast-te-lopen-op-e/ [Geopend februari 2023]

CASE STUDY

Productie van hernieuwbare vloeibare brandstoffen in Belgische raffinaderijen tegen 2050

Energia heeft in 2022 opdracht gegeven aan expertisebureau Enersangi om het belang van Belgische raffinaderijen in de transitie naar een klimaatneutraal Europa tegen 2050 in kaart te brengen. De focus van de studie ligt op het terugdringen van CO₂-uitstoot in de transportsector.

Transport over zee, via lucht of vrachtwagenvervoer is moeilijker te elektrificeren, en zal op basis van een diverse energiemix zijn in 2050. E-fuels nemen hier een aanzienlijk aandeel in. De vraag naar vloeibare brandstoffen in België bedraagt jaarlijks ongeveer 19 miljoen ton (6 miljoen voor personenwagens en lichte bedrijfsvoertuigen). Er wordt verwacht dat deze vraag in 2050 zal gedaald zijn tot 8 miljoen ton, waarvan 90% koolstofarm zou moeten zijn.

Belgische raffinaderijen zouden tegen dan 7 miljoen ton vloeibare hernieuwbare brandstoffen per jaar kunnen produceren voor zware vrachtwagens, scheepvaart en luchtvaart. De brandstoffen zouden bestaan uit een mix van duurzame biobrandstoffen en e-fuels. Productie van e-fuels kan geleidelijk aan, met in een eerste fase co-processing om dan over te schakelen naar ombouwen van bestaande proceseenheden om productie van e-fuels te verhogen. Die investeringen hiervoor worden geschat op 20 miljard euro.



Raffinaderij van de toekomst¹
Toenemende instroom van hernieuwbare en gerecycleerde grondstoffen voor de productie van koolstofarme en hernieuwbare brandstoffen, ook duurzame grondstoffen voor petrochemie.

Door deze verhoogde productie van e-fuels zal het totale elektriciteitsverbruik in België verviervoudigen, wat inhoudt dat de hernieuwbare elektriciteitsproductie tegen 2050 met een factor 15 moet verhogen¹.

¹ Energia, Het productiepotentieel van koolstofarme en hernieuwbare vloeibare brandstoffen van de Belgische raffinaderijen in 2050

CASE STUDY

Productie en gebruik e-methanol in Belgische havens

De haven van Antwerpen heeft in 2021 goedkeuring gekregen van de Europese commissie om een sleepboot om te bouwen naar een methanol aandrijving. De bouw van deze boot moet helpen om de haalbaarheid van e-methanol als duurzame brandstof in de scheepvaart aan te tonen. Verder wil de haven tegen 2025 ook uitgroeien tot een haven waar de schepen ook koolstofarme brandstoffen zoals methanol, waterstof of elektriciteit kunnen bunkeren¹.

In de haven van Gent loopt het North-C-Methanol project, een grootschalig demonstratieproject van North-CCU-Hub. Dit project omvat een elektrolyse eenheid met een capaciteit van 63 MW (elektriciteit afkomstig van windparken op zee). De zuurstof die vrijkomt bij de elektrolyse zal lokaal gebruikt worden in de staalindustrie, de waterstof wordt gecombineerd met afgevangen CO₂ (afkomstig van industriële puntbronnen). De verwachte opstart is in 2024 met een productiecapaciteit van e-methanol vanop 45000 ton per jaar².

¹ Nieuwe wereldprimeur voor haven van Antwerpen: methanol aangedreven sleepboot, Port of Antwerp Bruges, 23 juni 2021 <https://newsroom.portofantwerpbruges.com/nieuwe-wereldprimeur-voor-haven-van-antwerpen-methanol-aangedreven-sleepboot> [Geopend juni 2023]

² North CCU Hub, North-C-Methanol, North CCU Hub: <https://northccuhub.eu/nl/north-c-methanol-2/> [Geopend juni 2023]

ELEKTRISCHE BOILERS

Elektrische boilers voor industriële toepassingen zijn voornamelijk een van volgende twee types: een elektrische boiler of een electrode boiler. In het eerste geval zit er in de boiler een elektrische weerstand die warmte genereert, in het laatste geval wordt er gebruik gemaakt van hoogspanningselektrodes in een waterbad.

Het water dient als geleider tussen de elektrodes, en de elektrische energie wordt door de elektrische weerstand van het water zelf omgezet in warmte, met productie van stoom als gevolg. De elektrische boilers hebben over het algemeen een lagere thermische capaciteit dan electrode boilers. Typische capaciteiten voor de elektrische boiler liggen rond 5 MWe, bij electrode boilers varieert dit tussen 3 MWe tot 70 MWe¹. Nieuwe ketels kunnen tot 90 ton stoom per uur produceren op een werkingsdruk tot ongeveer 34 bar².

Het grote voordeel van elektrische boilers is het hoge rendement dat kan gaan tot 99,9%. Dit komt omdat de omzetting van elektrische naar thermische energie gebeurt met een efficiëntie van 100%. De enige verliezen zijn deze naar de omgeving toe, die in vergelijking met een klassieke boiler lager zijn door de afwezigheid van verbranding (en bijgevolg componenten op zeer hoge temperatuur). Verder zijn ze compact, stil, makkelijk te plaatsen (meestal directe aansluiting op middenspanningsnet mogelijk), makkelijk te regelen, heel responsief en zelfregelend.

Het is ook geen nieuw concept, waardoor ze betrouwbaar zijn en relatief makkelijk verkrijgbaar².

Bij een groot stoomverbruik, en bijgevolg elektriciteitsgebruik, kan de benodigde netaansluiting oplopen. Verder is er ook het gevaar op elektrocutie indien onvoldoende veiligheidsmaatregelen worden getroffen. De operationele kosten van een elektrische ketel zijn over het algemeen ook hoger dan een klassieke aardgasketel door de relatief hoge elektriciteitsprijs³.

Naast het vervangen van een klassieke boiler, kan ook een retrofit uitgevoerd worden. Uit een onderzoek van ECN part of TNO (Nederland) bleek dat dit enkel rendabel is indien er voldoende beschikbare ruimte op de elektriciteitsaansluiting beschikbaar is, de ketel een vermogen tussen 5 MW en 20 MW heeft en de elektriciteitskosten merendeel van de tijd lager zijn dan de gaskosten³. Een alternatief is om een elektrische boiler in parallel te plaatsen met een klassieke boiler, en het gebruik van beide boilers af te stemmen op de elektriciteits- en gasprijzen.

1 M. Marsidi, Electric industrial boiler, Energy.nl, 21 december 2018
<https://energy.nl/data/electric-industrial-boiler/> [Geopend juni 2023]

2 J. Nonneman, T. Schoonjans, J. Vander Heyde, M. De Paepe, M. van Belleghem, D. Lagrou en E. Verdeyen, Stoomproductie in de energietransitie, Vlaams Energie- en Klimaatagentschap, Brussel, 2021

3 TRANSfarm KU Leuven, TRANSfarm, 8 juni 2023
<https://set.kuleuven.be/over-ons/groepsdiensten-en-faciliteiten/transfarm> [Geopend juni 2023]

CASE STUDY

Regeling van luchtvochtigheid in pluimveestallen

Op de TRANSfarm site (KU Leuven)¹ is er een stoominstallatie geïnstalleerd in de pluimveestallen om de relatieve vochtigheid binnen de units met dieren te kunnen garanderen. Deze installatie is in werking getreden in mei 2023. In de volledige stal zijn er vier units geïnstalleerd (voor staldeel één) met elk een maximumvermogen van 49,7 kW. In het oude systeem werd er geen gebruik gemaakt van stoom, maar werd de luchtvochtigheid geregeld door water te vernevelen.

1 J. Nonneman, T. Schoonjans, J. Vander Heyde, M. De Paepe, M. van Belleghem, D. Lagrou en E. Verdeyen, Stoomproductie in de energietransitie, Vlaams Energie- en Klimaatagentschap, Brussel, 2021

BIOBRANDSTOFFEN

Biobaseerde brandstoffen of biobrandstoffen zijn brandstoffen die per definitie geen netto CO₂ uitstoten bij verbranding. Ze bestaan uit biomassa, i.e. materiaal van (recent) levende organismen zoals hout, palmolie, notendoppen... Via conversieprocessen wordt de biomassa omgezet in bruikbare biobrandstoffen (pyrolyse, vergassing, fermentatie...).

Het voornaamste verschil met fossiele brandstoffen is dat biobrandstoffen geen eeuwenoude CO₂ uitstoten bij verbranding, maar slechts recent geproduceerde CO₂ uit de afgelopen 50-100 jaar.

Volgens het Intergovernmental Panel on Climate Change zou een wereldwijde overstap van fossiele naar biobrandstoffen een CO₂-reductie teweeg kunnen brengen van 80-90%¹. Desondanks wordt verwacht dat het gebruik van biobrandstoffen in de toekomst vooral zal verschuiven naar sectoren waar het gebruik essentieel is: scheepvaart, luchtvaart, chemie, vezeltoepassingen²...

Afhankelijk van de kwaliteit en oorsprong van de biomassa, wordt een onderscheid gemaakt tussen:

- **Primaire biomassa:** rechtstreeks afkomstig van bos- of landbouw
- **Secundaire biomassa:** bijproducten van industriële of landbouwprocessen
- **Tertiaire biomassa:** afval na consumptie

Afhankelijk van de soort, bestaan verschillende vergunningen en regelgevingen. Tertiaire biomassa zal immers schadelijkere uitstootgassen hebben dan primaire biomassa. Het is dus aanbevolen de wetgeving omtrent biomassa in uw buurt te raadplegen alvorens een installatie te plaatsen.

Na de conversie kunnen de biobrandstoffen voorkomen in verschillende aggregatietoestanden³. De meest voorkomende biobrandstoffen zijn vast (75%), gevolgd door biogas (13%) en vloeibare biobrandstoffen (12%). Specifiek voor stoomproductie hebben deze vormen elk hun voor- en nadelen⁴.

Bij verbranding van **vaste biobrandstoffen** worden aanzienlijke hoeveelheden warmte vrijgegeven. De meest voorkomende vormen zijn houtachtig. Hedendaags worden deze voornamelijk ingezet voor grote vermogens, waaronder stoomproductie. België produceert echter niet voldoende biomassa om de vraag te beantwoorden⁴.

Biogas wordt bekomen door vergisting van biomassa. Het voornaamste voordeel aan biogas is dat het één op één uitwisselbaar is met aardgas. Stoomketels ontworpen voor biogas zijn vaak gelijkaardig aan klassieke aardgas stoomketels. Tegenwoordig bestaan er ook hybride of flexibele stoomketels (bijvoorbeeld Bosch Universal steam boiler UL-S(X)⁵, die zowel functioneren met bio- en aardgas. Biogascentrales worden ook ingezet om biogas in het aardgasnet te injecteren. De voortgang laat echter op zich wachten, in september 2022 was slechts 0,003% van het gasnetwerk van Fluvius afkomstig van Belgische biogasinstallaties².

Vloeibare biobrandstoffen, zoals bijvoorbeeld biodiesel en bioethanol, kunnen alternatieven bieden voor klassieke benzine. Het ontwerp van de stoomketel ligt opnieuw nauw bij een klassieke dieselketel. De biobrandstoffen worden echter minder ingezet voor stoomproductie, maar worden bijgemengd bij klassieke stookolie. Zoals eerder vermeld zijn biobrandstoffen CO₂-neutraal bij verbranding. Dit is zowel goed voor het milieu, maar kan ook zijn economisch voordeel leveren in de vorm van subsidies.

Ook voor bedrijven die lid zijn van het EU Emissions Trading System, waarbij emissies extra worden belast, kan overstappen naar een groene energiebron voordelig zijn⁶. Daarbij moeten echter enkele overwegingen in acht genomen worden.

1 E. K. Vakkilainen, Steam generation from biomass, Oxford: Elsevier, 2017

2 L. Pauwels, Het alternatief voor gas uit Rusland zit misschien in... frieten (en biogas), vrt nieuws, 28 september 2022 www.vrt.be/vrtnws/nl/2022/09/27/biogas-een-alternatief-voor-poeitngas/ [Geopend 7 april 2023].

3 J. Nonneman, T. Schoonjans, J. Vander Heyde, M. De Paepe, M. van Belleghem, D. Lagrou en E. Verdeyen, Stoomproductie in de energietransitie, Vlaams Energie- en Klimaatagentschap, Brussel, 2021

4 J. Deconinck, Energie besparen en alternatieve brandstoffen voor stoomketels, Stoomatlas deel 2, p.38-41, 2022

5 Bosch, Universal steam boiler UL-S, UL-SX, Bosch, juni 2021

www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/universal-steam-boiler-ul-s-ul-sx-669474-p/ [Geopend 7 april 2023]

6 V. de Groote, De prijs van stoom doorheen de energietransitie, Stoomatlas deel 1, p.37-39, 2022

Het transporteren van biomassa is nefast voor het milieu en de economische voordelen⁷. Een aanzienlijk deel van het gewicht van onverwerkte biomassa bestaat namelijk uit vocht (tot 50%), dat onnodig mee wordt getransporteerd. Dit zorgt ervoor dat houtachtige biomassa slechts economisch rendabel wordt als het niet verder vervoerd moet worden dan 50-150 km¹.

Minder transport is uiteraard ook voordeliger voor het milieu. Ontgonnen biomassa wordt bijgevolg preferabel lokaal of on-site verwerkt, bijvoorbeeld in de landbouwsector. In de landbouwsector kan stoom toegepast worden als desinfectie van stallen of melkmachines, of in voedselverwerkingsprocessen⁷.

Om 1 ton stoom te verkrijgen in atmosferische omstandigheden, is ongeveer 700 kWh energie nodig⁸. Eén kilogram houtpellets kan ongeveer 5 kWh warmte produceren⁹. De prijs voor één kilo houtpellets ligt rond 40 cent (maar dit is uiteraard variabel). Bijgevolg kost het 140 kg biomassa of 56 euro om 1 ton stoom te produceren. Vergeleken met gas aan 0,10 euro/kWh kost dezelfde stoom 70 euro¹⁰. In het algemeen is warmteproductie met houtpellets dus voordeliger dan met gas, alhoewel veel afhangt van de kwaliteit van de pellets (vochtgehalte, grootte...) en de huidige gasprijzen¹¹.

Tenslotte zou het gebruik van biomassa de beplanting van gewassen bevorderen¹², alhoewel dit niet altijd consistent gebeurt.

7 J. Fang, C. Liu, A. S. Mujumdar, H.-W. Xiao en C. Zhang, Superheated steam processing: An emerging technology to improve food quality and safety, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, p. 1-17, 2022

8 M. De Paepe, Stoom, de kracht van de natuur ten dienste van de mens, Stoomatlas deel, p. 26-27, 2018

9 Euopellets, Prijs houtpellets, Euopellets, 15 april 2023 <https://euopellets.be/prijs%20houtpellets/> [Geopend 18 april 2023]

10 VREG, Opbouw gemiddelde commerciële gasprijs, VREG, 31 maart 2023 https://dashboard.vreg.be/report/DMR_Prijzen_gas.html [Geopend 18 april 2023]

11 Enerpedia, Houtverbranding, Enerpedia, 31 maart 2015 <https://www.enerpedia.be/nl/energiethema/houtverbranding-6/> [Geopend 18 april 2023]

12 Bioenergy Europe, Bioenergy Essentials, 30 november 2022 www.bioenergyeurope.org/article/196-bioenergy-europe-essentials.html [Geopend 18 april 2023]

BIOMASSA-STOOMKETELS

Stoomketels met biogas of vloeibare biobrandstoffen hebben dezelfde werking als hun klassieke tegenhanger en worden hier niet verder besproken. Er moet wel rekening gehouden worden met andere bijproducten en een groter volume brandstof bij gebruik van biobrandstoffen. Tegenwoordig bestaan er ook hybride stoomketels die zowel fossiele brandstoffen als hun biologisch alternatief kunnen verwerken¹. Zo kan de brandstof gekozen worden die op dat moment het goedkoopst verkrijgbaar is.

De meest voorkomende methode om met behulp van biomassa stoom te produceren, is door klassieke verbranding. Vervolgens kunnen deze ketels, net zoals

klassieke ketels, efficiënter en betere stoom produceren met behulp van standaardtechnieken zoals voorverwarmen, cogeneratie, heropwarming, een warmtewisselaar...² Algemeen hebben biomassaketels die gebruik maken van een vaste brandstof een lagere efficiëntie wegens incomplete verbranding. Hoe kleiner de korrel, hoe groter de kans op complete verbranding, maar dit gaat gepaard met duurdere biomassa^{3,4}.

De meest populaire stoomketels die vaste biomassa verbranden, zijn de zogenaamde roosterovenketels (moving grate boiler). Deze worden voornamelijk ingezet voor middelgrote installaties (100 kW tot 100 MW)⁴.

1 D. Van Paemel, Efficiënt stoom opwekken, Stoomatlas deel 2, p. 30-33, 2022

2 D. Einstein, E. Worrell en M. Khrushch, Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials, 22 juli 2001 <https://escholarship.org/uc/item/3m1781f1>

3 Enerpedia, Houtverbranding, Enerpedia, 31 maart 2015: www.enerpedia.be/nl/energiethema/houtverbranding-6/ [Geopend 18 april 2023]

4 J. Nonneman, T. Schoonjans, J. Vander Heyde, M. De Paepe, M. van Belleghem, D. Lagrou en E. Verdeyen, Stoomproductie in de energietransitie, Vlaams Energie- en Klimaatagentschap, Brussel, 2021

CASE STUDY

Stoomketel benut biogas van brouwerij maximaal

In een bierbrouwerij in België wordt stoom ingezet voor het koken van wort en het steriliseren van bierflesjes. Tijdens het productieproces wordt ook biogas geproduceerd.

Callens ontwierp hiervoor een stoomketel dat dit afvalproduct kan benutten als brandstof. Deze levert verzadigde stoom van 8 barg op een temperatuur van 175°C aan een debiet van 2,5 ton per uur. Indien er te weinig biogas is, kan de boiler ook op aardgas opereren. Ongeveer 30% van volledige warmtevraag kan zo beantwoord worden met biogas.

CASE STUDY

Bio Energy Base in Gentse haven

Sinds juni 2022 is een nieuwe warmtecentrale van BEE (Belgian Eco Energy) in de Gentse haven operationeel. Deze genereert simultaan elektriciteit en warmte met biomassa, meer specifiek afvalhout afkomstig uit België en Nederland (niet verder dan 200 km). De centrale kan ook stoom produceren en verdeelt deze vervolgens onder meerdere bedrijven, afhankelijk van hun stoomvraag. De stoomgenerator heeft een maximale productie van 91 ton stoom per uur op een temperatuur van 425°C en een druk van 62 bar¹. Met behulp van rookgasbehandeling wordt de efficiëntie verhoogd en de uitlaatemissies beperkt².



Bio Energy Base in Gentse Haven

1 BEE, De Bio Energy Base- Een nieuwe biocluster in de Gentse Haven, BEE, 31 december 2022 www.bee.eu/nl/de-bio-energy-base-een-nieuwe-biocluster-in-de-gentse-haven [Geopend 30 juni 2023]

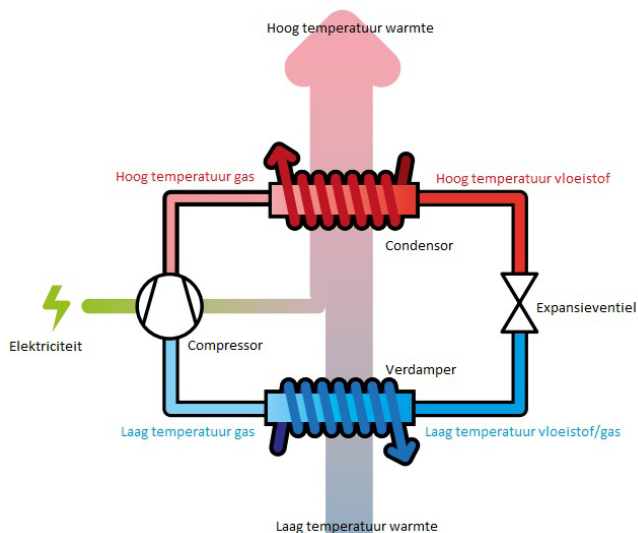
2 BEE, Bio Energy Base in Gentse Haven, Gent: Mondelinge communicatie, 2023

DAMP COMPRESSIE EN HEAT TRANSFORMER

Damp compressie warmtepompen zijn veruit het meest gebruikte type warmtepomp in zowel residentiële als industriële toepassingen. Een damp compressie warmtepomp neemt warmte bij een lage temperatuur op en geeft warmte bij een hoge temperatuur af, met behulp van elektrische energie.

DAMP COMPRESSIE WARMTEPOMPEN

Een dergelijke warmtepomp bestaat in zijn eenvoudigste vorm uit een koudemiddel en vier componenten (figuur¹).



Overzicht van componenten en energiestromen in damp compressie warmtepomp

In de verdamer neemt het koudemiddel, op lage druk en in het tweefasig gebied, warmte op van de bron op lage temperatuur. Het koudemiddel verlaat de verdamer typisch als oververhit gas. Het gasvormige koudemiddel uit de verdamer op lage druk wordt vervolgens gecomprimeerd in de compressor, hierdoor neemt de druk en vervolgens temperatuur toe. Dit compressieproces vereist externe arbeidsinvoer, en is typisch elektrisch gedreven. Vandaar dat damp compressie warmtepompen vaak elektrisch gedreven warmtepompen genoemd worden.

Het koudemiddel op hoge druk en hoge temperatuur uit de compressor stroomt vervolgens naar de condensor. In de condensor geeft het koudemiddel warmte af aan de bron met hogere temperatuur. Deze warmteoverdracht zorgt ervoor dat het koudemiddel finaal in vloeibare toestand verandert. Het typisch onderkoelde vloeibare koudemiddel op hoge druk na de condensor gaat vervolgens door het expansieventiel. In dit expansieventiel wordt de druk verlaagd.

Hierdoor daalt de temperatuur van het koudemiddel. Uiteindelijk zal de temperatuur van het koudemiddel lager zijn dan de temperatuur van de warmtebron op lage temperatuur. Hierdoor zal het proces opnieuw kunnen beginnen in de verdamer.

PRESTATIECOËFFICIËNT

De prestatie van een warmtepomp wordt uitgedrukt door de prestatiecoëfficiënt (Coefficient of Performance, COP). Deze COP geeft de verhouding tussen de geleverde warmte

$$COP = \frac{Q_{\text{geleverd}}}{W_{\text{elektrisch}}}$$

De COP is sterk afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het proces dat warmte vereist. Voor hogere temperatuurverschillen zal de COP afnemen.

Zoals te zien in de figuur is de totaal overgedragen warmte in de condensor de som van de opgenomen laag temperatuur warmte en het elektriciteit input. Hierdoor is de COP van een warmtepomp steeds groter dan 1.

Voor typische residentiële en industriële toepassingen ligt de COP vaak in de grootteorde 2-5^{2,3}. Een zuiver elektrische verwarming heeft idealiter een COP van 1, en zal dus 2 tot 5 maal meer elektriciteit vereisen om dezelfde hoeveelheid warmte te leveren.

Momenteel is de warmtepomp technologie een sterk ontwikkelde toepassing voor residentiële doeleinden, waar typisch relatief lage temperaturen vereist zijn. Voor industriële toepassingen is er nood aan warmte aan hogere temperaturen. Industriële warmtepompen die warmte leveren tot 95°C zijn sterk ontwikkeld en breed beschikbaar.

Warmtepompen die warmte leveren tot 120-150°C zijn bij een beperkt aantal producenten (binnenkort) verkrijgbaar. Warmtepompen op hogere temperaturen, tot 250°C, zijn momenteel nog in onderzoeksfase en onder ontwikkeling.

1 SINTEF: www.sintef.no/en/expertise/sintef-energy-research/heat-pump-technology/heat-pumps-for-decarbonizing-the-industrial-heat-supply/

2 C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann en S. S. Bertsch, High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, Energy, vol. 152, pp. 985-1010, 2018

3 R. D. Boer, Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat, 2020

Een overzicht van de producenten van hoge temperatuur warmtepompen met bijhorende capaciteiten, temperatuurranges, kost, TRL-niveaus... is beschikbaar binnen de IEA HPT Annex 58- Task 1- Technologies- Annex 58⁴. Aangezien de damp compressie warmtepomp elektriciteit vereist als primaire energiebron laat deze technologie toe de warmteproductie volledig te elektrificeren. Hierdoor kan de technologie theoretisch gezien volledig CO₂-neutraal zijn.

Met de huidige elektriciteit mix is dit echter niet het geval. Rekening houdende de huidige koolstof intensiteit van de elektriciteit productie zijn er desondanks nog reeds grote CO₂-besparingen mogelijk ten opzichte van klassieke boilers met verbranding van een brandstof, wegens de hoge COP⁵. Met de toenemende hoeveelheid hernieuwbare energie in de elektriciteitsmix, is het potentieel van deze technologie verzekerd. Verder zijn de operationele kosten van damp compressie warmtepompen enkele keren lager ten opzichte van elektrische boilers (veronderstel continue gebruik). Dit omdat het elektriciteitsverbruik enkele malen kleiner zal zijn. Als bijkomend gevolg kunnen de elektrische aansluitingen kleiner gedimensioneerd worden, wat cruciaal is voor grote installaties.

In de praktijk wordt een elektrische boiler echter vaak in parallel met een klassieke boiler geïnstalleerd. Het vervangen van de volledige installatie door een warmtepomp zal op vlak van CO₂-emissies dus zeker voordelig zijn (indien hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is). Op economisch vlak zal de rendabiliteit sterk afhangen van de gas- en elektriciteitsprijzen. Een ander voordeel van damp compressie warmtepompen is dat deze potentieel een koelvermogen kan leveren voor andere processen, mogelijks zelfs ijswater. Echter heeft deze technologie ook zijn nadelen en beperkingen.

De COP groter dan 1 is slechts mogelijk door het gebruik van een warmtebron (naast de elektriciteitsinput). Indien geen restwarmte beschikbaar is, kan er geen warmtepomp geïmplementeerd worden. Restwarmte kan omgevingswarmte zijn, of een warmtestroom die na een proces een te lage temperatuur heeft om nog gebruikt te worden. Omdat de industrie typisch hogere temperaturen vereist (> 100°C) is het potentieel van omgevingslucht of de grond als warmtebron, zoals gebruikt bij residentiele warmtepompen, financieel minder interessant maar niet onbestaande. Dit omdat het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het proces te groot zal worden, en dus een lage COP impliceert. Om deze reden is het potentieel van de warmtepomp technologieën ook vaak beperkt tot 200-250°C. Dit omdat er boven 100°C maar beperkt onbenutte warmtebronnen beschikbaar zijn.

Vaak wordt in industriële bedrijven een pinch analyse uitgevoerd waar alle warmtestromen in kaart worden gebracht en zo de opties voor energierecuperatie onderzocht worden. Hoge en lage temperatuur warmtestromen worden aan elkaar gekoppeld. Zo kunnen (niet meer bruikbare) warmtestromen op lage temperatuur als input-reststroom gebruikt worden voor een warmtepomp, en bijgevolg bijdragen bij de opwekking van hoge temperatuur warmte.

Een verder nadeel van de technologie is de relatief hoge investeringskost, wat vaak een barrière is voor de implementatie van warmtepompen. Daarnaast is er historisch ook het probleem dat heel wat koudemiddelen een van de volgende nadelen heeft: een hoog aardopwarming vermogen, ontvlambaar, giftig of een potentieel heeft tot PFAS-vorming. Het correct omgaan met koudemiddelen vereist dus bovendien opgeleid onderhoudspersoneel.

⁴ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>

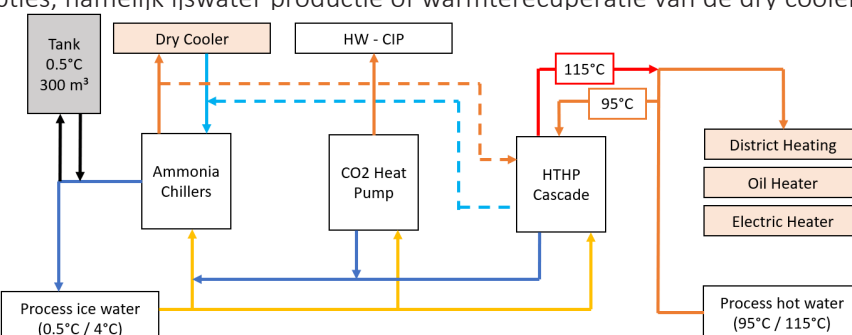
⁵ A. Marina, S. Spoelstra, H. A. Zondag en A. K. Wemmers, An estimation of the European industrial heat pump market potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 139, 2021

CASE STUDY

SkaleUp hoge temperatuur warmtepomp

De SkaleUp hoge temperatuur warmtepomp is ontwikkeld in samenwerking met SINTEF¹. De warmtepomp is ontworpen in een cascade configuratie, en laat toe om water onder druk op te warmen tot 115°C in de condensor. Aan de verdampers zijn er twee opties, namelijk ijswater productie of warmterecuperatie van de dry cooler circuits, zoals afgebeeld².

Deze warmtepomp is geïntegreerd als een retrofit voor bestaande boilers binnen de zuivelfabriek van TINE SA te Trondheim Noorwegen, waar jaarlijks 75 miljoen liter melk wordt geproduceerd. Beide operationele modes worden hier getest. Met een verwarmingscapaciteit van 300 kWth voorziet de SkaleUP warmtepomp 10% van de totale benodigde proceswarmte in de fabriek, de andere 90% wordt voorzien door een elektrische boiler. Het lage temperatuur warm water wordt voorzien door de CO₂-warmtepomp.



Illustratie van de SkaleUP warmtepomp integratie binnen TINE AS, Trondheim¹¹

Er is verder district heating en een olie boiler is aanwezig als back-up. Bovendien voorziet de SkaleUP warmtepomp met een koelvermogen van 150 kWth 10% van de koelingsvraag, de ammonia chiller 80% en de CO₂-warmtepomp 10%. De warmtepomp heeft 6500 operationele uren per jaar.

De warmtepomp is een cascade-installatie waarbij twee warmtepomp-cycli met verschillende koelmiddelen (zoals in de illustratie) worden gecombineerd. Zo kan op basis van de gewenste output-temperatuur het meest geschikte koelmiddel gebruikt worden. In deze configuratie worden propaan (R290) en butaan (R600) respectievelijk gebruikt voor de lage en hoge temperatuur cyclus. Met de configuratie kan een COP van 2 à 3 gehaald worden (afhankelijk van de exacte werkingstemperatuur). Wanneer ook het koelingspotentieel in rekening gebracht wordt, is de gecombineerde COP 3 à 4.

¹ M. O. McLinden, C. J. Seaton en A. Pearson, New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration, Science, vol. 370, p.791-796, 2020

² Task 1- Technologies- Annex 58: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>

MECHANISCHE DAMP RECOMPRESSIE

Alternatief aan de eerder beschreven damp compressie warmte pomp (gesloten lus), kan ook mechanische damp recompressie (MDR) gebruikt worden (open systeem), ook wel ‘open warmtepomp’ genoemd.

In deze systemen wordt een rest warmtestroom opnieuw opgewaardeerd door de stroom onder druk te zetten, bijgevolg stijgen de temperatuur en de energiewaarde. De druk verhogen gebeurt met behulp van een compressor en vereist dus elektriciteit. De MVR is een belangrijke technologie in de elektrificatie van de warmte industrie.

Ook hier kan de prestatie gekarakteriseerd worden door een COP. De COP geeft de verhouding weer tussen toegevoegde compressie-energie en de netto teruggewonnen warmte.

Energetische en economisch interessante toepassingen hebben een COP van minstens 3,5. COP's van 10 of meer zijn haalbaar¹.

Een MDR vereist doorgaans hogere investeringskosten dan een klassieke, gesloten warmtepomp, maar heeft vaak kortere terugverdientijden door het lagere energieverbruik. Een MDR wordt typisch gebruikt voor het drogen van vloeibare producten (afvalverwerking), het indikken of concentreren van vloeistoffen (zuivelindustrie), en het destilleren of scheiden van vloeistoffen (chemische sector)².

1 P. Donnellan, K. Cronin en E. Byrne, Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, 2015

2 Electrabel, Centrale les Awirs, Antilope Printing, Brussel, 2012

CASE STUDY

MDR bij Dow Terneuzen boekt goede resultaten

In Terneuzen (Nederland) staat een MDR-installatie op de productiesite van het chemische bedrijf Dow Benelux, één van de twaalf grootste industriële bedrijven van Nederland.

De MDR-installatie kan 14 ton stoom per uur opwaarderen van 3,5 naar 12 barg (foto¹). De COP is gelijk aan 12, bijgevolg kan met 1,5 MW elektriciteit, 12 MW warmte (stoom) geproduceerd worden. Dankzij deze installatie wordt ieder jaar 10 miljoen Nm³ aardgas bespaard, wat overkomt met een CO₂-reductie van 20 kton. De installatie is ook financieel voordelig, aangezien nu lagedruk stoom opnieuw kan opgewaardeerd worden naar een bruikbaar niveau².



Mechanische damp recompressie installatie in Terneuzen

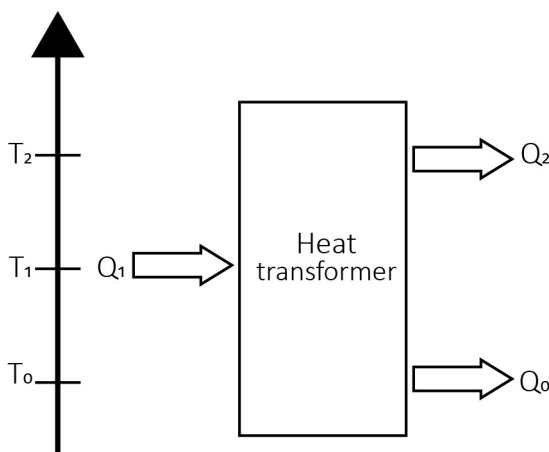
1 Callens, Stoomketel benut biogas van brouwerij maximaal, Callens, 1 december 2021 www.callens.eu/nl/warmtetechniek/stoomketels/stoomketel-benut-biogas-van-brouwerij-maximaal [Geopend 15 juni 2023]

2 Electrabel, Centrale les Awirs, Antilope Printing, Brussel, 2012

HEAT TRANSFORMER

In tegenstelling tot de damp compressie warmtepomp is er geen primair elektriciteitsverbruik bij een heat transformer (ook gekend als een Type-II warmtepomp), op het aansturen van enkele componenten met een beperkt elektriciteitsverbruik na.

Een heat transformer verplaatst warmte (Q_1) van een warmtebron op een tussenliggende temperatuur (T_1) naar een stroom (Q_2) op hoge temperatuur (T_2) en een stroom (Q_0) op lage temperatuur (T_0).



Overzicht energiestromen in een heat transformer

Het primaire energieverbruik bij een heat transformer is de warmte op het tussenliggende temperatuur niveau (Q_1). Het opwaarderen van de warmte op de tussenliggende temperatuur naar de stroom op hoge temperatuur wordt dus niet gedreven door een compressor zoals bij damp compressie warmtepompen. Dit wordt echter gedreven door het temperatuurverschil tussen de warmtebron op tussenliggende temperatuur (T_1) en de warmtestroom op lage temperatuur (T_0). De werking van deze heat transformer kan gebaseerd zijn op verschillende principes, zoals: absorptie, adsorptie of fysisch-chemische reacties¹.

PRESTATIECOËFFICIËNT

De prestatiecoëfficiënt (COP) van een heat transformer wordt beschreven door de hoeveelheid geleverde warmte op hoge temperatuur (Q_2), tot de hoeveelheid onttrokken warmte op de tussenliggende temperatuur (Q_1). Deze COP wordt ook omschreven als de **thermische COP**.

$$COP = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Omdat er ook warmte afgegeven wordt op lage temperatuur zal deze COP steeds kleiner zijn dan 1. Afhankelijk van de temperatuurverschillen zal deze COP typisch variëren tussen 0,25-0,5². Dit wil zeggen dat voor elke eenheid aan thermische energie gevraagd op hoge temperatuur, 2 tot 4 units aan restwarmte op tussenliggende temperatuur vereist zijn. De COP zal stijgen naarmate het temperatuurverschil tussen de restwarmtebron (T_1) en de stroom op hoge temperatuur (T_2) zal dalen. Verder zal de COP ook stijgen naarmate het temperatuurverschil tussen de restwarmtestroom op tussenliggende temperatuur (T_1) en de stroom op lage temperatuur (T_0) toeneemt.

De stroom op lage temperatuur is typisch koeling water, dat naar een koeler gestuurd wordt. De prestatie van een heat transformer zal dus licht afnemen met stijgende buiten-temperaturen.

Soms wordt de prestatie van een heat transformer ook uitgedrukt door een **elektrische COP**. Deze COP weergeeft de verhouding tussen de geleverde warmte op hoge temperatuur (Q_2) en het elektriciteitsverbruik (W_{el}). Aangezien het elektriciteitsverbruik heel minimaal is bij heat

$$COP = 1 - \left(\frac{T_0}{T_1} \right) \left(\frac{T_2}{T_2 - T_0} \right)$$

¹ Voor een beschrijving van het werkingsprincipe wordt doorverwezen naar de literatuur:

¹ J. M. S. Dias en V. A. F. Costa, Adsorption heat pumps for heating applications: A review of current state, literature gaps and development challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 98, 2018
² S. Ülkü, Adsorption heat pumps, 1986, vol. 6
³ F. Cudok, Absorption heat transformer- state-of-the-art of industrial applications, renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 141, 2021
⁴ J. M. Pinheiro, S. Salústio, J. Rocha, A. A. Valente en C. M. Silva, Adsorption heat pumps for heating applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119, 2021
⁵ Z. Xu en R. Wang, Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development, Frontiers in Energy, vol. 11, 2017

² P. Donnellan, K. Cronin en E. Byrne, Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, 2015

transformers kan deze elektrische COP oplopen tot meer dan 30³. De heat transformer technologie wordt in een mindere mate toegepast in vergelijking met de damp compressie warmtepomp. Wel zijn deze commercieel beschikbaar. Enkele producenten van heat transformers zijn QPinch en Thermax. Het grootste voordeel van de heat transformer is dat deze technologie geen gas en slechts een klein aandeel elektriciteit verbruikt. Hierdoor zijn de operationale kosten heel laag, en is de invloed van de energieprijzen heel miniem. Bovendien zijn geen grote elektrische aansluitingen vereist. Een verder gevolg is dat deze technologie rechtstreeks geen CO₂ zal uitstoten. Ook hebben de werkingsmedia in heat transformers geen aardopwarming of ozonafbrekend vermogen, noch zijn ze ontvlambaar. Deze technologie heeft ook weinig bewegende componenten waardoor deze technologie niet onderhoudsintensief is. Een gevolg van het minieme elektriciteitsverbruik is dat een grote hoeveelheid

aan restwarmte nodig is. Dit aangezien het proces vereist dat er ook warmte op lage temperaturen, als drijvende kracht, afgegeven wordt. Hierdoor is er veel restwarmte vereist, namelijk 2 tot 4 maal zoveel als de hoeveelheid warmte die geleverd wordt.

In veel processen is er minder restwarmte beschikbaar dan gevraagd wordt. In dergelijke gevallen zal een heat transformer slechts een deel van de gevraagde warmte kunnen leveren, waardoor vaak een gas boiler als bijkomende verwarming nodig is. Een alternatief is het koppelen van verschillende processen, zoals een exotherm proces met een proces dat warmte vraagt. Dergelijke processen worden vaker in de (petro)chemische industrie teruggevonden. Een verder nadeel van de heat transformer technologie is dat de installatie veel ruimte inneemt, wat leidt tot hoge investeringskosten. Een installatie van 10 MWth zal ongeveer een grondoppervlak van 100 m² nodig hebben en zal 1000 ton wegen.

3 Task 1- Technologies- Annex 58: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>

CASE STUDY

Qpinch installatie bij Borealis

Binnen de industriële warmtepomptechnologie is Qpinch een belangrijke Belgische speler met klanten in België maar ook daarbuiten, tot zelfs in Noord-Amerika en Azië. Qpinch in dit opzicht uniek omdat het gebruik maakt van een chemisch aangedreven, gepatenteerd proces. In België heeft Qpinch drie units op industriële schaal, één van deze installaties staat bij Borealis in Zwijndrecht. Deze installatie recupereert de restwarmte van drie verschillende warmtebronnen en brengt deze samen in één Qpinch-unit. De installatie produceert, afhankelijk van de stoomvraag door Borealis, een stoomdruk tussen 3 en 10 barg.

De 1,3 MW installatie bij Borealis levert zo een absolute besparing op van 2,8 ton CO₂/jaar en 13300 MWh/jaar aan aardgas, equivalent aan de aardgasverwarming van +/-1000 Vlaamse huishoudens. Het unieke aan het Qpinch-proces is dat het vereiste elektriciteitsvermogen slechts 4% van dit thermisch geleverd vermogen is. Met andere woorden 1 eenheid elektriciteit genereert 25 eenheden nuttige warmte. Voor restwarmterecuperatie met temperaturen tussen 80°C en 130°C, heeft de installatie een negatieve CO₂-voetafdruk en is dus voor bedrijven in, onder andere de petrochemische en staalindustrie, zeer geschikt als onderdeel van hun decarbonisatieportfolio om hun opgestelde klimaatdoelstellingen te bereiken. De foto toont de geïnstalleerde Qpinch-heat transformer op de Borealis site.



QPinch-heat transformer bij Borealis

auteurs:

Maité Goderis - Jera Van Nieuwenhuyse - Manon Everaert - Elias Vieren - Michel De Paepe

behoren tot:

Department of Electromechanical, Systems and Metal Engineering – UGent, Ghent, Belgium
Maite.Goderis@UGent.be

FlandersMake@UGent – Core lab EEDT-MP, Leuven, Belgium
www.flandersmake.be



Verantwoordelijke uitgever:

Energik vzw, platform voor Duurzaam Stoomgebruik
Industriegebied Mechelen Zuid II
De Regenboog 11
2800 Mechelen
E-mail: info@energik.be

November 2023

