

Op weg naar een duurzame toekomst

Uit de recent bekend geworden plannen van onze regering blijkt een visie op een duurzame toekomst te ontbreken zoals dat overigens ook al veel langer het geval is. In discussies hierover met studenten, promovendi en anderen wordt vaak gezegd dat het dan ook uitermate moeilijk is om een enigszins geloofwaardig beeld van die duurzame toekomst te maken vanwege de complexiteit van het probleem en onder andere dat regeringen een beperkte zittingsduur hebben en moeten inspelen op de wensen van de kiezers. Dit laatste is eigenlijk heel erg vreemd wanneer we bedenken dat het toch niet onmogelijk moet zijn om goede plannen te maken en die gefundeerd toe te lichten naar de kiezers toe, zodat er een breed draagvlak kan ontstaan. Het is waar dat een duurzame toekomst zeer complex is, maar dat hoeft ons er niet van te weerhouden om binnen onze eigen context daarover na te denken en voor ons, die aan een universiteit verbonden zijn, is dat zelfs een noodzaak. Wij willen onze studenten immers voorbereiden op de toekomst en hoe zouden wij dat goed kunnen doen als we daar zelf nauwelijks een beeld van hebben? Het voordeel van een Technische Universiteit in dit opzicht is de sterke gerichtheid op de exacte wetenschappen en toepassing in de praktijk.

*- door dr.ir. H.J. van der Kooi**

Door mijn werk als thermodynamicus en het toepassen van het begrip exergie voor de verbetering van processen en producten is het duidelijk geworden dat exergie en daarmee samenhangende noties een belangrijke rol kunnen spelen in het denken over de technologische component van het begrip duurzaamheid. Doordat we een keuzecollege: "Energie, materie en leven" voor eerstejaars studenten van de Faculteit TNW hebben mogen verzorgen waarin de procesindustrie vergeleken werd met cellulaire processen, was het mogelijk om te laten zien dat er veel uitdagingen voor de procesindustrie zijn en dat we veel van levensprocessen kunnen leren. Hierdoor is het ook

duidelijk geworden dat, om een vollediger beeld van de technologische component van duurzaamheid te krijgen, het noodzakelijk is hierin ook belangrijke aanknopingspunten met de levensprocessen en het leven op onze aarde meer in het algemeen te betrekken. Na deze inleiding zal wat verder worden ingegaan op voor ons belangrijke kennis rond het begrip exergie, iets van wat we kunnen leren van het leven op aarde, de technologische component van duurzaamheid en ten slotte iets over toepassing van die kennis op de rioolwaterzuiverings problematiek.

Exergie

Zonder uitgebreid in te willen gaan op



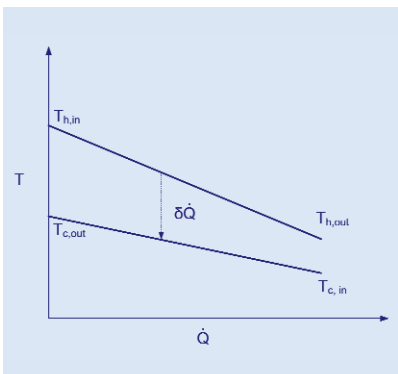
Dr.ir. H.J. van der Kooi

het begrip exergie[1,2] worden alleen wat voor ons belangrijke aspecten verder toegelicht. Exergie is de maximale hoeveelheid arbeid/vermogen die uit een systeem kan worden verkregen door het systeem op reversibele wijze in evenwicht te brengen met een referentieomgeving. Deze referentieomgeving wordt gekarakteriseerd door de actuele druk en temperatuur van de omgeving van het beschouwde systeem. In veel gevallen is het mogelijk om een temperatuur van 298,15 K te kiezen en een druk van 101,325 kPa. Theoretisch is het denkbaar om bij deze druk en temperatuur alle stoffen die in de atmosfeer, de hydrosfeer en de lithosfeer, het bovenste gedeelte van de aardkorst, voorkomen denkbeeldig met elkaar te laten reageren totdat uiteindelijk de toestand van de laagste Gibbs energie ontstaat. Deze toestand wordt wel de "dode toestand" genoemd. De in werkelijkheid gekozen stoffen of de mogelijke mengsels daarvan zijn op enigerlei wijze een benadering van deze "dode toestand"[3].

* Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Afdeling Bouw Technologie

Drijvende krachten en stromen

Als voorbeeld zullen wij naar de overdracht van thermische energie van een situatie van hogere naar een situatie bij lagere temperatuur kijken. In figuur 1 is een T,Q-diagram weergegeven waarin twee materiestromen met verschillende totale warmtecapaciteiten thermische energie uitwisselen. Op een bepaald punt in de warmtewisselaar veronderstellen we dat de temperatuur van de "warme" stroom T_h en van de "koude" stroom T_c is en bovendien dat een kleine hoeveelheid thermische energie δQ van de "warme" naar de "koude" stroom overgaat.



T,Q-diagram waarin δQ van de "warme" stroom op T_h wordt overgedragen naar de "koude" stroom op T_c

- FIGUUR 1 -

Het maximale vermogen dat we uit deze hoeveelheid thermische energie kunnen halen in een omgeving van ons systeem waar de temperatuur T_0 is wordt volgens Carnot gegeven door vergelijking 1:

$$\delta \dot{W}_{rev}(T_h) = \delta \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) \quad 1$$

De term tussen haken in het rechterlid van vgl. 1 wordt wel de Carnot-factor genoemd. Wanneer deze kleine hoeveelheid thermische energie aan de "koude" stroom wordt overgedragen bij een temperatuur T_c wordt het maximale vermogen dat dan verkregen kan worden gegeven door vergelijking 2:

$$\delta \dot{W}_{rev}(T_c) = \delta \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) \quad 2$$

Wanneer we vgl. 2 van vgl. 1 aftrekken krijgen wij het vermogen dat door dit

proces van de overdracht van thermische energie verloren is gegaan. Dit is weergegeven in vergelijking 3:

$$\delta \dot{W}_{verlies} = T_0 \delta \dot{Q} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h}\right) \quad 3$$

Zoals we uit vgl.3 kunnen zien is er door dit proces van overdracht van thermische energie inderdaad vermogen verloren gegaan in het door ons tot nu toe beschouwde deelsysteem van de warmtewisselaar. De totale entropieproductie in ons deelsysteem wordt gegeven door vergelijking 4:

$$\dot{S}_{productie} = \delta \dot{Q} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h}\right) \quad 4$$

Door vgl.3 met behulp van vgl.4 te herschrijven krijgen we vergelijking 5:

$$\delta \dot{W}_{verlies} = T_0 \dot{S}_{productie} \quad 5$$

Vgl.5 wordt wel de Gouy-Stodola relatie genoemd. Uit deze relatie zien we dat het verlies aan vermogen gelijk is aan het product van de omgevings-temperatuur en de totale entropieproductie. In vgl. 4 is δQ de stroom aan thermische energie die van de temperatuur T_h wordt overgedragen naar de temperatuur T_c en deze wordt vaak weergegeven door het symbool dJ . De term tussen haken wordt de drijvende kracht genoemd en wordt vaak met het symbool X aangeduid. In het algemeen kan worden bewezen dat voor een systeem een minimaal aantal onafhankelijke werkzame drijvende krachten en hun gerelateerde stromen kunnen worden gedefinieerd, waardoor de meest algemene vorm van vgl. 4 kan worden geschreven zoals in vergelijking 6 te zien is [3]:

$$\dot{S}_{productie} = \sum_i dJ_i X_i \quad 6$$

Terugkerend naar vgl.3 kunnen we voor δQ schrijven:

$$\delta \dot{Q} = U dA (T_h - T_c) \quad 7$$

Door deze vergelijking 7 in vgl.3 te substitueren krijgen we vergelijking 8:

$$\delta \dot{W}_{verlies} = T_0 U dA (T_h - T_c) \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h}\right) \quad 8$$

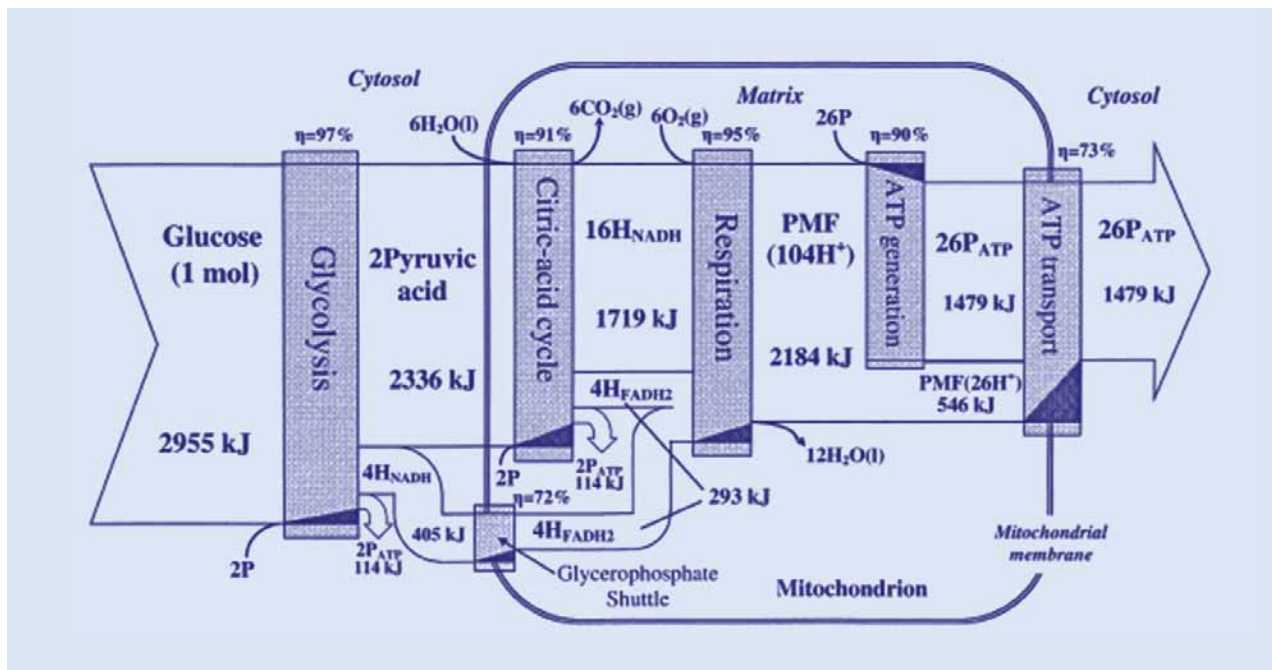
Vgl. 8 kan worden herschreven in, zoals in vergelijking 9 is te zien:

$$\delta \dot{W}_{verlies} = T_0 U dA \frac{(T_h - T_c)^2}{T_h T_c} \quad 9$$

Uit vgl. 9 zien we dat het vermogensverlies evenredig is met het kwadraat van het temperatuurverschil ($T_h - T_c$) en dat dit zwaarder weegt bij lage dan bij hoge temperaturen. Doordat we in het algemeen een bepaalde δQ willen overdragen ligt deze waarde vast maar door dA te vergroten en ($T_h - T_c$) evenredig te verkleinen kan het vermogensverlies worden verkleind met als consequentie dat het warmtewisselend oppervlak van de warmtewisselaar moet worden vergroot wat op zichzelf ook weer met vermogensverlies gepaard gaat. Onder andere door de materiaalkeuze en de stromingscondities in de warmtewisselaar is de waarde van U te vergroten waardoor $T_h - T_c$ kan worden verkleind.. Uit dit specifieke voorbeeld zien we dat bij processen, die uitsluitend bij door ons ingestelde drijvende krachten kunnen verlopen altijd met verlies aan arbeid of vermogen gepaard gaan, maar dat we daar in een brede context kijkende wat aan kunnen doen door een zo goed mogelijk ontwerp voor het proces te maken en dat dan vervolgens zo goed mogelijk te concretiseren.

WAT WIJ KUNNEN LEREN VAN DE LEVENSPROCESSEN OP AARDE?

Het leven op aarde is op te vatten als een dynamisch systeem dat voornamelijk wordt aangedreven door de exergie van de op de aarde vallende zonnestraaling. Op basis hiervan worden koolstofdioxide en water omgezet naar koolhydraten in planten en zuurstof die aan de lucht wordt afgegeven. Door een gedeelte hiervan te verbranden komt exergie beschikbaar voor de opbouw van andere essentiële stoffen die in planten voorkomen. Hierbij spelen ook diverse mineralen een rol die uit de bodem of in een aantal gevallen uit het water worden opgeno-



Het Grassmann-diagram (exergie-diagram) waarin de omzetting van 1 mol glucose naar de belangrijkste exergiedrager adenosine tri fosfaat (ATP) in de primaire cel is weergegeven. Hierbij wordt glucose met lucht zuurstof geoxideerd tot koolstofdioxide en water.

- FIGUUR 2 -

men, waarvoor ook weer de inzet van exergie nodig is. Uit een recente studie van Sander Lems [4] is gebleken dat veel van de door hem onderzochte cellulaire processen uitermate efficiënt verlopen, met uitzondering van die stappen waarbij regeling van de processen aangrijpt of bijvoorbeeld om de in de eerste stappen van de fotosynthese vrijgemaakte elektronen zo efficiënt mogelijk naar de reactieve centra te transporteren, waarvoor een relatief groot potentiaalverschil door de plant moet worden gehandhaafd. De glucoseafbraak zoals die in primaire cellen verloopt om de exergiedrager adenosine tri fosfaat (ATP) te maken, is in een zo genoemd Grassmann-diagram in figuur 2 weergegeven, hierin zijn de exergieverliezen bij de diverse omzettingstappen duidelijk te zien. In de eerste stadia hangen opbouw en afbraak dus al ten nauwste samen. In een groter geheel gezien is dat ook zo doordat planten voedsel voor dieren vormen en planten en dieren uiteindelijk sterven. Door allerlei afbraakmechanismen komen de mineralen weer in de bodem terecht en worden ook koolstofdioxide en water weer aan de omgeving afgegeven. In verband hiermee worden verschillende natuurlijke elementenkringlopen onderscheiden. De mogelijk bekendste daarvan is de

koolstofkringloop. Onze fossiele voorraden zijn uiteindelijk van plantaardige en/of dierlijke oorsprong, die via geologische processen in de door ons onderscheiden vormen; zoals aardgas, aardolie en steenkolen zijn omgezet. Door het intensieve verbruik daarvan komen voornamelijk koolstofdioxide en water vrij, waarbij water maar zeer beperkt oplosbaar is in onze atmosfeer maar de koolstofdioxideconcentratie in voornamelijk de atmosfeer en in de hydrosfeer toenemen, doordat dit veel sneller wordt toegevoerd dan dat het door planten kan worden vastgelegd. Met andere woorden de koolstofcyclus verkeert niet meer in een stationaire toestand waardoor allerlei (ongewenste) effecten kunnen optreden die we op dit moment zeker niet volledig kunnen overzien. Samenhangend met de elementenkringlopen, de condities op aarde en de in benadering min of meer stationaire toestand waarin het leven op aarde verkeert, is er sprake van een zekere mate van biodiversiteit. Door het gebruik van de aarde door de mens en de emissies vanuit onze technosfeer naar de natuur is er sprake van een drastische afname van de biodiversiteit en zijn reeds vele soorten uitgestorven.

DE TECHNOLOGISCHE COMPONENT VAN DUURZAAMHEID

Op basis van het voorgaande kunnen nu de hoofdlijnen van de technologische component van duurzaamheid worden geschetst. Het bronvermogen, afgezien van de geheel of ten dele door de aarde bepaalde processen zoals geologische processen of verweringsprocessen, voor de processen die zich op aarde afspelen wordt geleverd door de zon. Het verbruik van fossiele grondstoffen leidt tot het afgeven van stoffen in de atmosfeer, de hydrosfeer en de lithosfeer die daar voor het verbruik niet in die mate voorkwamen, dit in tegenstelling tot het op de aarde ingestraalde vermogen. In een duurzame toekomst moeten we onze processen aandrijven met zonne-exergie. Het behouden van biodiversiteit en omdat die al langere tijd aan het afnemen is het zo mogelijk weer laten toenemen daarvan is voor duurzaamheid ook noodzakelijk. Hiervan afgeleid kunnen we stellen dat de natuurlijke elementenkringlopen door onze menselijke activiteiten niet moeten worden verstoord en dat uitsluitend emissies naar de omgeving zijn toegestaan die geen negatieve invloed op die omgeving hebben en dus stoffen betreft die al in die verhouding in onze directe omgeving voorkomen. Omdat alle

materialen slijten is het noodzakelijk dat de daarbij vrijkomende stoffen de natuurlijke kringlopen niet verstoren of dat zij in bijzondere gevallen zonder negatieve effecten in de directe omgeving kunnen worden opgenomen.

Andere stoffen moeten zo toegepast en aan het einde van hun levensduur zodanig kunnen worden hergebruikt dat de benodigde inzet aan exergie zo klein mogelijk is en dat de slijtageproducten niet in de omgeving terecht kunnen komen. De ingestraalde zonne-exergie wordt al in belangrijke mate op de aarde benut voor de natuur en voor het transport van water naar andere plaatsen op de aarde.

Wanneer we bijvoorbeeld met PV-cellen elektriciteit willen produceren moeten we er op toezien dat de gemiddelde interactie van de zonnestraling met het bestraalde oppervlak en in de nacht de karakteristieken van het dan gemiddeld uitstralend oppervlak voor en na toepassing van de PV-cellen hetzelfde blijft. Hierdoor zal het duidelijk zijn dat we onze processen zodanig moeten laten verlopen dat ze exergetisch gezien zo efficiënt mogelijk verlopen.

Hierdoor zal het duidelijk zijn dat we het voorgaande kunnen samenvatten door te stellen dat:

- onze processen moeten worden aangedreven door de exergie van de zonnestraling;
- de processen exergetisch gezien zo efficiënt mogelijk moeten verlopen, de drijvende krachten goed moeten worden gekozen en zo klein mogelijk zijn;
- de natuurlijke kringlopen niet mogen worden verstoord en dat elementen, waarvoor wij geen natuurlijke kringloop kennen, zo moeten worden toegepast dat ze niet in de biosfeer terecht kunnen komen. Voor niet gevaarlijke stoffen die in de bodem van een bepaalde omgeving voorkomen kunnen deze vanuit de technosfeer in dezelfde vorm en verhouding aan de bodem worden afgegeven bv. om ten dele verstoven bodems weer aan te vullen. Wanneer we dat zouden willen, kunnen we dit derde punt ook in exergiewaarden uitdrukken of een dimensieloze parameter definiëren als het quotiënt van de exergie-inzet in de meest optimale, reversibele, situatie en de werkelijke exergie-inzet.

ENIGE OPMERKINGEN OVER DE AFVALWATER PROBLEMATIEK GEZIEN IN HET LICHT VAN DE TECHNOLOGISCHE COMPONENT VAN DUURZAAMHEID

Om een voorbeeld te bespreken zullen we ons concentreren op de stroom van menselijke excrementen. Deze stroom van menselijke excrementen is een gevolg van de stoffen die wij tot ons nemen en in het geval van onze voeding zijn die stoffen van plantaardige en/of dierlijke aard. In het laatste geval staat ook plantaardige voeding aan het begin van de keten.

Tegenwoordig wordt veel kunstmest toegepast om de voedingsgewassen zich zo goed mogelijk te laten ontwikkelen en de belangrijkste elementen daarvan zijn stikstof, fosfor en kalium. De eerste wordt door de zo genoemde stikstofbinding uit de lucht verkregen een proces waarbij naar verhouding veel exergieverlies optreedt. De beide andere worden uit omzetting van mineralen verkregen uiteraard ook gepaard gaande met exergieverlies. In de natuur wordt stikstof uit de lucht tijdens onweer met zuurstof omgezet in stikstofdioxide die met regen in de bodem terechtkomen en die door de meeste planten kunnen worden opgenomen. Verder zijn er stikstofbindende bacteriën die in symbiose met planten zoals vlinderbloemigen leven en die daardoor stikstof voor de plant beschikbaar maken en die ook in de bodem terechtkomt bij het afsterven van de bacteriën. Om de hoeveelheid kunstmest voor de bodem terug te brengen moeten we deze elementen uit de excrementen weer aan de bodem waar de planten groeiden toevoeren. Het zal duidelijk zijn dat dit al op een zo klein mogelijke schaal en zo volledig mogelijk zou moeten gebeuren, waardoor de uit de bodem in de directe omgeving onttrokken elementen weer aan die bodem ten goede kunnen komen.

In de huidige situatie van het vermengen van diverse waterstromen zoals keuken/badkamerwater, regenwater en de waterige excrementenstroom als we voorbijgaan aan andere waterige afvalstromen, en de verwerking daarvan in afvalwaterzuiveringsinstallaties, wordt de meeste stikstof als stikstofgas aan de atmosfeer afgegeven en komen de elementen fosfor en kalium ten dele, afhankelijk van de bewerking, in de slibstroom en ten dele in de effluent-

stroom terecht. Het zal duidelijk zijn dat dit verre van duurzaam is. De elementen kalium en fosfor die in minerale vorm aan de bodem onttrokken waren eindigen uiteindelijk voor een deel in de zee en kunnen daar bijdragen aan excessieve groei van bepaalde planten waardoor verstoring van het ecosysteem ter plaatse optreedt en wanneer het slib bijvoorbeeld via slibverbranding verwerkt wordt, zal fosfor gedeeltelijk via de verbrandingsgassen worden afgevoerd (door gasbehandeling kan een belangrijk deel worden teruggewonnen) terwijl de rest en het grootste deel van kalium in de as terechtkomt, die helaas niet direct voor voeding van planten geschikt is. Om dit te verbeteren moet ons einddoel zijn om de kringlopen van stikstof, fosfor en kalium zoveel mogelijk te sluiten en bv. de natuurlijke stikstofkringloop niet te belasten.


Stikstof komt voor een belangrijk deel voor in urine in de vorm van ureum een stof die door planten als stikstofbron kan worden benut. Dit, maar ook het feit dat het mengen van stromen met exergieverlies gepaard gaat en ook het daaropvolgende eventueel noodzakelijke ontmengen kost in het algemeen veel exergie, leidt ertoe dat we de beide excrementenstromen niet zouden moeten mengen en ieder afzonderlijk zo optimaal mogelijk zouden moeten behandelen, waardoor ze zo goed mogelijk voor hergebruik beschikbaar moeten worden gemaakt. De besproken elementen stikstof, kalium en fosfor zouden zo volledig mogelijk naar het land, waarop de voedingsgewassen hebben gegroeid en in de vorm waarin ze kunnen worden opgenomen moeten worden toegediend. Plantaardige voeding kan relatief veel stoffen bevatten die niet worden verteerd en die in de ontlasting terechtkomen. Ten dele zouden deze stoffen als organische stof die voor de verbetering van het natuurlijke bodemleven noodzakelijk kan zijn, wanneer daarin al niet op een andere wijze is voorzien, aan de bodem kunnen worden toegevoerd. Wanneer dat niet noodzakelijk is zou bv. de cellulosefractie gehydrolyseerd en gefermenteerd kunnen worden, waarbij ethanol en koolstofdioxide vrijkomen. Deze ethanol zou bv. als biobrandstof in verbrandingsmotoren of voor gecombineerde productie van elektriciteit en thermische energie kunnen worden gebruikt.

CONCLUSIES

In het voorgaande is een schets gemaakt van wat aan te duiden is als de technologische component van duurzaamheid, de context waarin sprake kan zijn van een duurzame technologische toekomst. Hierbij speelt het exergiebegrip een belangrijke rol omdat processen alleen dan kunnen plaatsvinden in de door ons gewenste richting wanneer we voldoende grote drijvende krachten kunnen instellen om onze doelen te bereiken. Uiteindelijk moeten al die drijvende krachten worden gerealiseerd op basis van de inzet van ingestraald vermogen van de op de aarde vallende zonnestraling onder de eerder genoemde voorwaarden.

Andere belangrijke voorwaarden zijn ontleend aan de biosfeer en de daarin verloopende processen en het behouden, zo mogelijk, de vergroting van de biodiversiteit.

Als voorbeeld is iets gezegd over mogelijke consequenties voor de verwerking en toepassing van twee excrementen van de mens. Hierbij is voor-

namelijk aandacht besteed aan zo kort mogelijke elementencycli van stikstof, fosfor en kalium tussen bodem, mens en bodem. Om een en ander verder uit te werken is uiteraard gericht onderzoek noodzakelijk maar doordat het doel duidelijk is kan dit zo optimaal mogelijk worden uitgevoerd. Hopelijk kan deze bijdrage verhelderend werken om ons een redelijk beeld van een duurzame technologische toekomst te kunnen maken en daar ons handelen op te richten. 

LITERATUUR

1. T.J. Kotas. *The exergy method of thermal plant analysis*. London, 1985. Butterworths/Academic Press.
2. J. Szargut, D.R. Morris and F.R. Steward. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Berlin, 1988. Springer-Verlag.
3. J. de Swaan Arons, H.J. van der Kooi and K. Sankaranarayanan. *Efficiency and Sustainability in the Energy and Chemical Industries*.

4. S. Lems. *Thermodynamic Explorations into Sustainable Energy Conversion Learning from living systems*. Proefschrift Delft, 2009. Wöhrmann Print Service.



Bij de voorplaat

Kijk elders in het TVVL-magazine voor een uitgebreide projectomschrijving over de nieuwbouw voor het Albert Schweitzer Ziekenhuis te Dordrecht en de bijdrage die Kuijpers Installaties daaraan levert.

Kuijpers heeft vestigingen in Arnhem, Den Haag, Helmond, 's-Hertogenbosch, Roosendaal, Tilburg en Utrecht



Kuijpers Installaties en Albert Schweitzer Ziekenhuis Dordrecht:

Kennis van installeren

Kuijpers Installaties staat voor activiteiten op het gebied van ontwerpen, realiseren en onderhouden van technische installaties in gebouwen en industrie. Hierbij staat de opdrachtgever in alle opzichten centraal. Maatschappelijke betrokkenheid en duurzaam ondernemen vormen de basis van de onderneming. Een vooraanstaande positie op het gebied van energiezuinige en milieuvriendelijke concepten en toepassingen is daarvan het gevolg.

Kuijpers Installaties past haar kennis van installeren toe in meerdere zorginstellingen in Nederland zoals: Sint Franciscus Gasthuis te Rotterdam, Elkerliek Ziekenhuis te Helmond en Deurne, Universitair Medisch Centrum St Radboud te Nijmegen, Saffier Stichting te Den Haag, Universitair Medisch Centrum te Utrecht, VieCuri Medisch Centrum voor Noord-Limburg te Venlo en het Amstelland Ziekenhuis te Amstelveen.

Kuijpers Installaties
T 0492 57 86 00

Voorelkaar
www.kuijpers.com