

Organic Rankine Cycle betaalbaar?

Dit artikel gaat in op de rol die airconditioningapparatuur kan spelen in het duurzaam maken van onze maatschappij. Airconditioningapparatuur wordt over het algemeen gezien als veel energiegebruikende apparatuur. Hierbij voorbijgaand aan het feit dat in veel delen van de wereld niet kan worden gewoond en gewerkt indien airconditioning achterwege blijft. Veelal wordt bij airconditioning gedacht aan koelen, wat slechts een gedeelte van de totale functie is. De laatste jaren worden vooral de verwarmingsmogelijkheden van deze apparatuur veelvuldig toegepast. Het onterecht genoemde, omgekeerd Rankine-proces, toegepast in de warmtepomp, blijkt een uiterst effectief proces vergeleken bij de verwarming door middel van verbranding van fossiele brandstoffen. Dat deze apparatuur door een beperkte aanpassing ook inzetbaar is om elektriciteit te produceren vanuit afvalwarmte zal voor velen een verbazingwekkende ontwikkeling zijn. De Organic Rankine Cycle (ORC) is ontwikkeld vanuit de gedachte dat bij decentrale opwekking van elektriciteit door middel van een gas/dieselmotor-gedreven generator een maximum rendement van 35 % tot 40 % mogelijk is. Dit rendement is behoorlijk lager dan elektriciteit, opgewekt in de elektriciteitscentrale, die in STEG-configuratie 60 % haalt. Natuurlijk is het gebruik van de restwarmte lokaal een mogelijkheid, echter er moet dan wel noodzaak zijn tot verwarmen. Indien deze warmte niet te gebruiken is, dan kan de ORC een extra omzetting tot bruikbare elektriciteit geven. Vanuit deze toepassing zijn er grote stappen gemaakt richting standaardisatie, die naar verwachting eind 2008 begin 2009 tot een marktintroductie zal leiden.

*- door ing. T.J.M. van Giezen**

De huidige generatie koelmachines in zowel water- als luchtgekoelde uitvoering zijn allang niet meer de energievreters van vroeger. De strenge regelgeving hebben de ontwerpers gedwongen om heel efficiënte ontwerpen te maken. Naast een beperkte energievraag in vollast, bepaald door zeer goede warmtewisselaars, naar machines die veel meer zijn gemaakt om goed te functioneren in deellast. Een zeer goede capaciteits-

regeling door multicompressortechniek, in combinatie met een toerenregeling geven seizoensrendementen oplopend van 5 voor de luchtgekoelde units tot 10 voor de watergekoelde versies. Rendementen van 5 tot 10 vergeleken met de maximale 1 in verbrandingsketels zijn uiterst aantrekkelijk en reden om eens goed naar de theorie van de kringloop van de koelmachine te kijken waarom deze rendementen zo hoog zijn.

Koeltechniek wordt veelal in het log P-h diagram uitgezet (zie figuur 1).

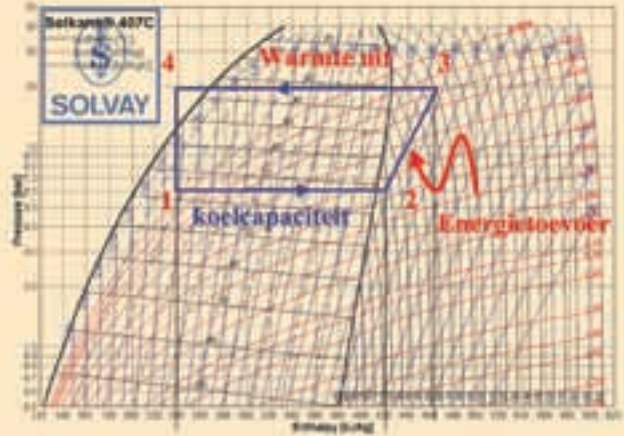
In figuur 1 is zeer duidelijk te zien dat de externe energietoevoer aan de compressor slechts een klein deel is ten opzichte van de aangegeven koelcapaciteit. Het rendement van deze kringloop wordt bepaald door de temperatuurgrenzen. Hoog temperatuur koelen en lage condensatietemperaturen hebben een positief effect op het rendement. Uit het diagram is ook direct af te leiden dat deze kringloop kan worden gebruikt om warmte te leveren. De hoeveelheid energie die dan beschikbaar is, is gelijk aan de koelcapaciteit plus de externe energietoevoer. Rendement van het koelproces plus 1. Omdat de warmte op een vast temperatuurniveau hier de vraag is, zal in deellast geen hoger rendement haalbaar zijn. Dit in tegenstelling tot de in deellast sterk dalende condensatietemperaturen bij koelmachines.

Nu blijkt dat een hoog rendement kan worden gehaald op verwarming is de stap naar een praktische toepassing logisch. De combinatie met een goede bruikbare bron (aquifer) waaruit warmte wordt onttrokken kan een verwarmingsrendement opleveren van 4. Met de opwekking van elektriciteit meegerekend minimaal een verbetering van 30 % op primaire energie.

Naast verwarmingsvermogen wordt gelijktijdig koelvermogen geproduceerd waarbij, mits dit opgeslagen blijft tot in de zomerperiode, kan dienen als bron voor koeling. De warmtepompinstallatie is in combinatie met bronnen dus in staat om beide energiestromen nuttig te gebruiken. Het resultaat is airconditioningapparatuur die in de installatie met 1 kW elektriciteit, 3 kW aan koeling kan leveren en 4 kW aan

* Carrier Nederland BV Divisie Airconditioning

Van koeltechniek



warmte. Is dit kringloopproces nog anders in te zetten?

ELEKTRICITEIT OPWEKKING D.M.V. EEN RANKINE KRINGLOOP

In onze centrales wordt de Rankine-kringloop ingezet voor de opwekking van elektriciteit. Hierbij wordt water/stoom als het werkende medium gebruikt, is de capaciteit groot (>100 MW elektrische opwekking) en wordt de installatie in de centrale samengesteld. Het thermische rendement, theoretisch gelimiteerd door het temperatuurverschil tussen verdampen en condenseren, heeft vandaag een waarde van circa 40 %. Hogere rendementen worden gerealiseerd door het toevoegen van een gasturbine die de uitlaatgassen als warmte toevoert aan de ketels. Deze combinaties halen een totaal rendement van bijna 60 %!

Als proces lijkt de Rankine-kringloop zeer veel op het onterecht genoemde omgekeerde Rankine-kringloop van de koeltechniek.

De Rankine-kringloop gebruikt voor de productie van elektriciteit de volgende vier processtappen:

1. adiabatische drukverhoging door een pomp;
2. warmtetoevoer bij gelijkblijvende druk in een voorverwarmer, stoomketel en oververhitter (verdampen);
3. adiabatische expansie in de turbine;
4. warmteafvoer bij gelijk blijvende druk in een condensor (condenseren).

Met de tendens naar steeds meer decentrale energieopwekking, ontstaat er vraag naar kleinere vermogens die niet kunnen worden ingevuld door de stoom/water-cyclus maar worden ingevuld door motoren (2.000-200 kW) en microturbines (250-25 kW). Deze lokale productiemethoden hebben niet

De kringloop bestaat theoretisch uit:
 1-2 warmtetoevoer bij gelijk blijvende druk (verdampen van koudemiddel)
 2-3 adiabatische drukverhoging in de compressor
 3-4 warmte afvoer bij gelijke druk (condenseren van koudemiddel)
 4-1 drukverlaging zonder warmte uitwisseling met de omgeving (gelijke enthalpie)

Log P-h diagram.

- FIGUUR 1-

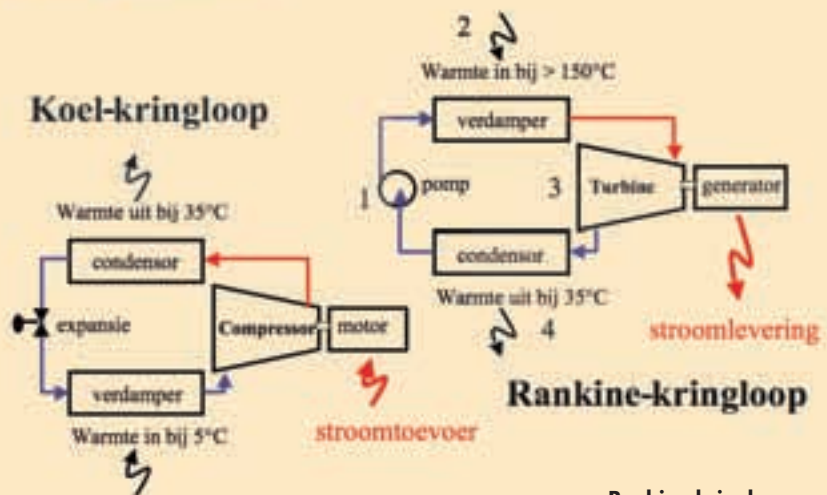
het allerhoogste rendement. Van 35 % voor de motorgedreven generatoren tot circa 25 % voor de microturbines. Natuurlijk wordt de combinatie met warmte regelmatig gemaakt, maar indien deze warmte niet bruikbaar is, dan is het inzetten van een noodkoeler in het uiterste geval noodzakelijk. Is het nu mogelijk om bij lokale energieopwekking de (afval)warmte te gebruiken om nogmaals elektriciteit te produceren en zo de lokale rendementen verder omhoog te krijgen? Is het mogelijk een Rankine-kringloop toe te voegen die deze verbrandingswarmte gebruikt? Hierbij moet vooraf worden aangetekend dat door de kleine capaciteit en lage temperaturen dit absoluut niet met een stoom/water-cyclus kan worden gerealiseerd.

“Creatief omgaan met de altijd aanwezige energie om ons heen en deze met slimme apparatuur omzetten in bruikbare energie is de aanbeveling”

VAN COMPRESSOR TOT TURBINE: EEN TOEVALLIGE ONTDEKKING

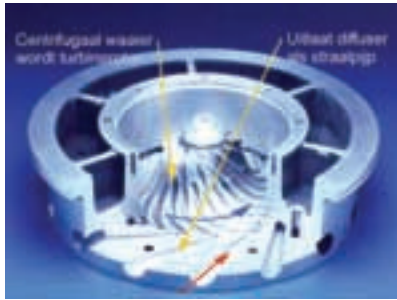
In de jaren negentig is door de uitbanning van de cfk's het lagedruk koudemiddel R11 vervangen door HFK 134a. Om dit hogedruk koudemiddel toe te passen in een één-traps centrifugaalcompressor zonder dat er instabiliteit en een slechte compressor-efficiency

Het vergelijken



Rankine-kringloop.

- FIGUUR 2 -



Turbine

- FIGUUR 3 -

ontstond, was alleen mogelijk door het zeer gecontroleerd omzetten van snelheidsdruk naar statische druk. Hiervoor werd de compressor voorzien van een extra ring met een aantal tunnel diffusers. Zeg maar kleine uitlaatkanaaltjes die langzaam in vorm en diameter verlopen. Na deze diffuser worden de hete gassen weer in het slakkenhuis verzameld en naar de condensor gevoerd. Tijdens het testen van de prototypen bleek dat bij een stroomuitval de waaier behoorlijk lang de verkeerde kant op ging draaien, te verklaren uit het feit dat de uitlaatdiffusers als een soort straalpijp gingen werken. De turbine, hoe beperkt ook, was geboren.

Theoretisch moest nu de vraag worden opgelost hoe een slechte turbine nu een goede wordt.

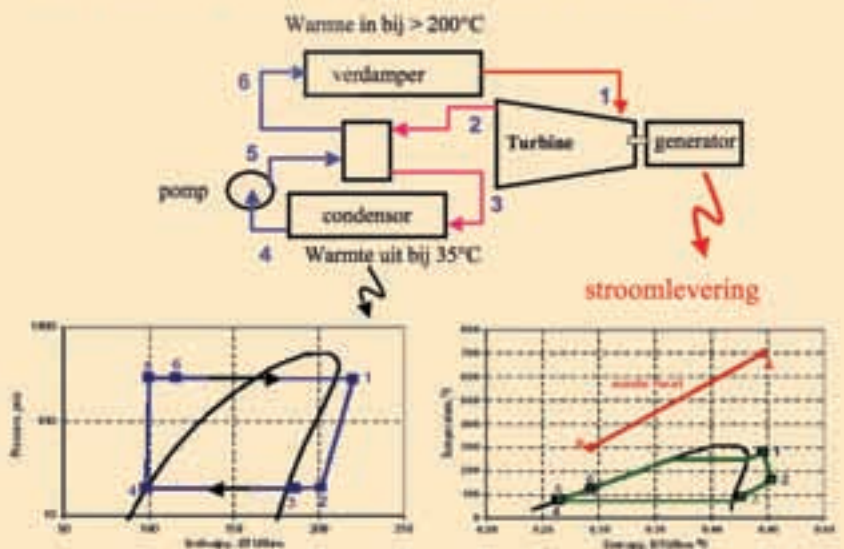
Het blijkt dat de organische stof R245fa een perfecte match vormt in een R134a-compressor uit de koelmachine toegepast als turbine in een afvalwarmte ORC.

Afmetingen, snelheden en krachten blijven allemaal op een gelijk niveau in de verschillende toepassingen. De turbine drukverhoudingen bij de bedachte ORC-condities variëren tussen 8 en 10. Deze drukverhouding is veel groter dan de compressormachine, die tussen 2 en 4,5 varieert. Door de andere stofeigenschappen blijkt er juist een gelijkwaardige specifieke volumeverhouding te zijn. Dit houdt in dat de expansieturbine eenvoudig kan worden ontworpen door het aanpassen van de tunneldiffuser naar een supersonische straalpijp en de rotor-geometrie. Haalbaar dus in de hardware van de bestaande airconditioningcompressor met behoud van rotatiesnelheid en diameter.



- FIGUUR 4 -

Optimaliseren afhankelijk van temperatuursprong.



Hier het T-S Diagram voor de warmteterugwinning versie maar ook het Log Ph diagram. In het Log P-h Diagram is goed te zien dat er een behoorlijk voelbare warmtetoever is. Dit in tegenstelling tot stoom waar voornamelijk latente warmtetoever is. Dit betekent dat de afvalwarmte naar een lagere temperatuur kan worden teruggekoeld. Ook is het zo dat de oververhitting in de turbine oploopt wat als voordeel heeft dat er geen erosie kan optreden.

- FIGUUR 5 -

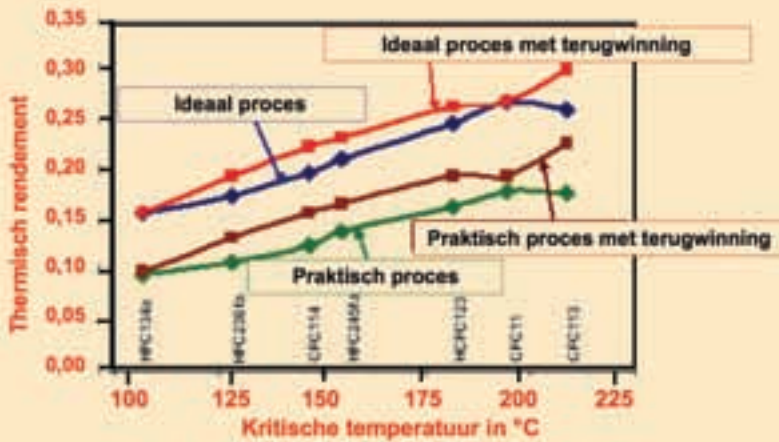
DE COMPLETE ORGANIC RANKINE CYCLE

Nu de compressor met kleine interne aanpassingen kan worden ingezet als turbine, kijken we naar de overige componenten zoals de condensor en verdamper. Belangrijk hierbij is dat de druk in de machine (PED) bij de hogere temperaturen binnen de ontwerplimieten blijft. Koudemiddel R245fa biedt deze mogelijkheden. Zoals uit het eerdere vergelijk bleek is de condensor voor zowel de koelmachine als de ORC gelijk in condities.

Alleen het aanpassen van de circuitverdeling en de verzamelaar zijn noodzakelijk zoals we dat op dit moment ook al doen voor de verschillen tussen R407C, R410A en R134a. De gascoeler (verdamper) wordt inmiddels ook al gemaakt. Deze techniek is terug te vinden als generator in gasgestookte absorptie koelmachines. Vanzelfsprekend met de aanpassing van LiBr naar R245fa.

Vermeld moet worden dat R245fa als koudemiddel niet zomaar uit de lucht

Optimaliseren afhankelijk van temperatuursprong.



Optimalisatie

- FIGUUR 6 -



ORC machine in bedrijf

- FIGUUR 7 -

komt vallen. Honeywell heeft recentelijk dit gas geïntroduceerd als vervanger voor de in de schuimproductie nog steeds gebruikte HCFK middelen. De eigenschappen van dit middel blijken goed te passen bij de temperatuurtrajecten die voorkomen wanneer we mikken op laagwaardige afvalwarmte.

Ondertussen zijn er diverse praktijktoepassingen in bedrijf. Een voorbeeld is een afvalstortplaats waar de gassen worden afgefakkeld. De uitlaatgassen van deze verbranding worden met lucht bijgemengd naar een lagere temperatuur van circa 350 °C om toegepast te kunnen worden in onze standaard apparatuur. In principe zonde want de temperatuurdaling betekent een afname van de exergie en dus een daling van het netto haalbare rendement.

De hier opgestelde installatie levert 200 kW elektriciteit, die eenvoudig kan worden getransporteerd naar de vraag. Hoewel in de praktijk reeds betrouwbaar, is er een forse investering in apparatuur nodig en wordt de installatie gelijk de stoom/water-kring-

loop ter plaatse samengebouwd, m.a.w. het gaat om een grote stationaire installatie.

De afvalgassen van fakkels maar ook van gasturbines en dieselgeneratoren zijn behoorlijk hoog in temperatuur. Zo hoog zelfs dat een warmtewisselaar een behoorlijke rendementsverbetering tot gevolg heeft.

Turboden en Tri-O-Gen hebben zich gespecialiseerd op de hogere temperatuur vanuit de uitlaatgassen. Door te kiezen voor bijvoorbeeld Toluëen wordt een prima thermodynamisch koudemiddel gekozen om bij hogere temperaturen een hoog rendement te halen. Door de grotere oververhitting van de uitlaatgassen vanuit de turbine (in het diagram van 2 naar 3) kan een extra warmtewisselaar warmte terugwinnen en "gratis" inzetten aan de verwarmingskant (opwarming van vloeistof van 5 naar 6). Deze temperaturen en drukken bij R245fa zijn voor de bestaande airconditioningapparatuur vanuit geïndustrialiseerde massaproductie niet mogelijk en maakt de apparatuur goed qua thermisch rendement, maar duur in aanschaf. Terugverdienen is hier de uitdaging!

DE KEUZE VAN DE ORGANISCHE STOF

Is R245fa naast de bruikbaarheid in het ontwerp theoretisch ook de juiste keuze? Het blijkt dat koudemiddelen met een hogere kritische temperatuur een hoger rendement leveren. R113, R11 en R123 zijn de bekende stoffen die we vroeger in de koelmachines ook

al gebruikten om hoge rendementen te halen. R245fa doet het weer beter dan R134a waarbij de andere middelen niet eens in de grafiek zijn opgenomen.

In de grafiek zien we de ideale volledig omkeerbare processen vanuit de thermodynamica. Zeg maar wat is haalbaar indien alles ideaal is en zonder verlies. Hiernaast de praktische rendementen gebaseerd op de volgende condities:

- warmtetoevoer in de verdamper van 370-150 °C. Koudemiddel opwarming tot 95 % van de kritische druk. +/- 150 °C voor R245fa en +/- 100 °C voor R134a. Condenseren op 22 °C;
- rendement pomp 40 %;
- rendement turbine 80 %;
- drukverlies in de leidingen en warmtewisselaars 1K. Afhankelijk van het koudemiddel levert de warmteterugwinning een rendementsverbetering op.

Met alle bekende theorieën en de wens om aan te sluiten bij onze bestaande apparatuur zijn er vele situaties doorgekeurd. Een watergekoelde testopstelling waarbij een tussenwarmtewisselaar is geplaatst en een gasgedreven separaat opgestelde verdamper die warmte uit de uitlaatgassen gebruikt. Verdampen op 120 °C en condenseren op 22 °C leverde een rendement van 15 %. Hoewel veel belovend qua toepassing bracht dit niet de doorbraak om vanuit ontwerp door te stomen naar productie.

"De compressor als turbine.

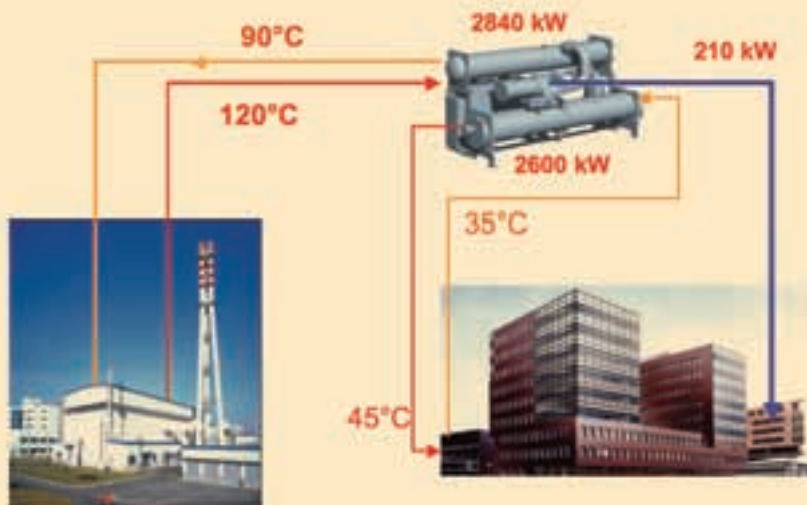
Wie had dat gedacht?"

DE BELANGRIJKE DOORBRAAK

De doorbraak kwam toen er in Alaska een mogelijkheid kwam om R134a toe te passen bij heel laagwaardige geothermische warmte en het handhaven van een voldoende temperatuursprong door gebruik te maken van de altijd aanwezige koude rivier.

In het vakantieoord Chena Hotsprings in Alaska werken op dit moment twee stuks ORC-machines, waarbij de aardwarmte vanuit de warme bronnen met een temperatuur van circa 74 °C de

Een meer dan goede toepassing.



Een meer dan goede toepassing

- FIGUUR 8 -

verdamper voedt en de watergekoelde condensor wordt gevoed met water van circa 7 °C. Het netto rendement komt hierbij uit op circa 7,5 %. Op basis van investering en afschrijving zijn de kosten teruggerekend naar 7 dollarcent per kWh, daar waar dit eerder 30 dollarcent per kWh was. Vanzelfsprekend was deze succesvolle inzet reden voor "UTC Power" om deze toepassing te standaardiseren. Niet op zoek naar een zo hoog mogelijke temperatuur van de afvalstroom, maar aansluiten bij de veel voorkomende lagere temperatuurniveaus en temperatuursprongen is het streven.

Voor de eenvoudige modulaire insteek sprak nieuwe klanten aan, waarbij vervolgoopdrachten zijn verkregen voor geothermieprojecten vanuit andere Amerikaanse staten.

De stap van 60 naar 50 Hz is de volgende die er aan komt. Want om in plaats van ruim 200 kW te zakken naar circa 160 kW bij ongewijzigde hardware is natuurlijk een gemiste kans. Intern moet de tandwieloverbrenging en de bijbehorende 50 Hz belasting worden aangepast en doorerekend. Hierdoor is de verwachting dat eind 2008 begin 2009 deze ORC commercieel op de Europese markt zal zijn. Vooruitlopend zijn er natuurlijk tal van mogelijke toepassingen doorerekend.

Dit bijgaande voorbeeld betreft stadsverwarming waarbij ORC als tussen-

warmtewisselaar de hoge temperatuur omzet in 210 kW elektriciteit en een prima lage temperatuurstraject heeft gelijk aan onze warmtepompen. Snel rekenen leert een efficiency van 7,5 %. Dit relatief lage rendement kan sterk worden verbeterd indien de trajecten wijzigen. Door te spelen met trajecten en toepassingen kan de efficiency naar maximaal 12 % worden gebracht. Warmteafvoer dient dan op een niveau van 25 °C naar 30 °C te gebeuren.

CONCLUSIE

Als laatste de stap naar portemonnee, milieu en duurzaamheid.

Door de toepassing van een 200 kW ORC wordt de productie van elektriciteit in de centrales voorkomen en wordt dus minder fossiele brandstof verbrand, met als gevolg hiervan minder uitstoot van CO₂ en van NO_x. (1.400 ton CO₂ en 4,1 ton NO_x volgens de Amerikaanse Environmental Protection Agency)

Natuurlijk is het niet van belang elkaar de loef af te steken met verminderde uitstoot van schadelijke gassen. Duurzaamheid moet als ontwerper in je genen zitten. Wat er helpt is een betaalbare duurzaamheid en een eenvoudig toepasbare. Dit is ons streven waarbij we denken dat een terugverdientijd haalbaar zal blijken van minder dan vier jaar. Creatief omgaan met de altijd aanwezige energie om ons heen en deze met slimme apparatuur omzetten in bruikbare energie is de

aanbeveling. Airconditioningapparatuur biedt zoals aangegeven hierin vele mogelijkheden. 