

Haalbaarheidsstudie ORC in combinatie met WK

Een haalbaarheidsstudie naar de mogelijke toepassing van de combinatie van een ORC met een gasmotor of gasturbine bij hotels, ziekenhuizen, verpleeghuizen, tuinbouwbedrijven, universiteiten en industrie.

In opdracht van Tri-O-Gen BV

September 2004



Princenhofpark 15-18
3972 AD Driebergen
tel. 030 691 1844
fax 030 691 1765
info@cogen.nl
www.cogenprojects.nl

Haalbaarheidsstudie ORC in combinatie met WK

Een haalbaarheidsstudie naar de mogelijke toepassing van de combinatie van een ORC met een gasmotor of gasturbine bij hotels, ziekenhuizen, verpleeghuizen, tuinbouwbedrijven, universiteiten en industrie.

In opdracht van Tri-O-Gen BV

September 2004

Uitvoering door:

Jos van Buijtenen – Tri-O-Gen, V-Bèta, TU Delft

Rolf Jan van Hasselt – Cogen Projects

Erik Koolwijk – Cogen Projects

Han Lemmens – Gasunie Research (in opdracht van Gasunie Trade & Supply)

Marcin Siedlecki – TU Delft



V-BÈTA

GASUNIE RESEARCH



Deze studie werd mede mogelijk door ondersteuning van:



landbouw, natuur en voedselkwaliteit



Trade & Supply

Senter dossiernummer: EDI 03088

Kenmerk: Tri-O-Gen B.V./ EDI 03088

Projecttitel: De Organic Rankine Cycle nageschakeld aan een gasmotor - WK of gasturbine - WK bij hotels, ziekenhuizen, verzorgingshuizen, tuinbouwbedrijven en universiteiten.

Voorwoord

Voor u ligt het verslag van de haalbaarheidsstudie naar de combinatie van warmtekracht met de Organic Rankine Cycle in opdracht van Tri-O-Gen te Goor. Deze studie is een gezamenlijke inspanning geweest van Cogen Projects, TU Delft, Gasunie Research en V-Bèta. Graag spreken wij hier onze dank uit jegens onderzoekers, begeleiders en samenstellers van het rapport. Tevens gaat onze dank uit naar het Productschap Tuinbouw, het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, SenterNovem en Gasunie Trade & Supply voor de financiële ondersteuning van deze studie.

Wij hopen dat deze studie mag bijdragen aan de toepassing van de ORC in de praktijk en daarmee aan een efficiënter en duurzamer energieverbruik.

September 2004.

Trio-O-Gen B.V. , Goor

Samenvatting

In dit rapport zijn de competenties van de deelnemende partijen en hun specialistische methoden en technieken samengebracht, om de technische en economische haalbaarheid van de Tri-O-Gen ORC in warmtekracht toepassingen in Nederland in kaart te brengen.

De prestaties van de ORC zijn gedefinieerd door de sectie Thermal Engineering van de TU Delft, op basis van de daar ontwikkelde computercode Cycle Tempo[®]. Dit leidde tot modellen, die niet alleen bruikbaar zijn voor de in dit rapport onderzochte cases, maar ook voor andere toepassingen. Er kon een beperkte validatie worden verricht, met veelbelovende resultaten.

Door Cogen Projects is de markt geanalyseerd, eerstens om de kansrijke toepassingen te identificeren, die in deze studie verder zouden worden uitgewerkt, en ten tweede om in die toepassingen het marktvolume te voorspellen. Met behulp van het programma Cogen Master interactive, kon de economische waarde van inzet van de Tri-O-Gen ORC worden bepaald, in de geïdentificeerde kansrijke toepassingen. Hierbij is gebruik gemaakt van huidige economische randvoorwaarden zoals tariefstelling voor gas en elektriciteit. Voor de meeste invoergegevens in de economische berekening zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Enkele vooraf kansrijk geachte sectoren zijn moeten afvallen (hotels en verzorgingstehuizen), waarvoor in de plaats een uitgebreidere blik is ontwikkeld op toepassing in de industrie. Daarvoor is de combinatie met een kleine gasturbine als casus genomen.

Er bleek een aantrekkelijk economisch perspectief voor toepassingen, waarbij:

- De kracht/warmte verhouding hoog is, resp. stijgt door veranderingen in de bedrijfsvoering van de WK exploitant
- Sprake is van een hoge bedrijfstijd per jaar (> 5000 uur)
- De elektriciteit lokaal kan worden ingezet, en dus kan worden gewaardeerd tegen de inkooprijks van de gebruiker
- Er een overschot aan warmte is.

Deze bevindingen zijn afgezet tegen het huidige WK park in de onderzochte sectoren, en de voorziene groei van deze sectoren en de daar aanwezige trends.

Dit leidde tot voorspellingen t.a.v. het aantal in te zetten ORC's in de komende jaren. Zo is er een potentieel van 170 ORC's geschat in de tuinbouw, en enkele tientallen in de gebouwde omgeving (ziekenhuizen/universiteiten).

Er blijkt een aanzienlijk milieuvoordeel te behalen bij de toepassing van de ORC. Helaas komt dit niet cijfermatig tot uitdrukking in de economische evaluatie. Zodra waarde ontleend kan worden aan deze effecten middels emissierechten zal dit wel het geval zijn.

De hoogte van de benodigde investering in het nieuwe product ORC zal via de bouw van een 0-serie en verdere ontwikkeling op een niveau gebracht moeten worden dat marktconform is. In de huidige studie is van een voorzien prijsniveau bij ontwikkelde productie uitgegaan. Voldoend hoge productieaantallen en daarmee verdere prijsdaling, kunnen ook de nu nog minder aantrekkelijke sectoren binnen bereik brengen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Inleiding	5
2. Opzet haalbaarheidsstudie	7
3. Werkingsprincipe ORC/Technologie	9
3.1 Het Tri-O-Gen ORC concept.....	9
3.2 De HTG: High Speed Turbo-Generator.....	10
3.3 De Tri-O-Gen ORC package.....	11
3.4 Toepassingen.....	11
4. Voorbereiding en uitgangspunten beschouwde casussen	12
4.1 Inventarisatie gebruikte gegevens	12
4.2 Gegevens per sector	14
4.3 Conclusies inventarisatie	16
5. Modelleren en simulatie ORC met Cycle Tempo	16
5.1 Ontwerpberekening	16
5.2 Bedrijfssituatie (deellast) berekening	16
5.3 Simulaties.....	16
5.4 Validatie.....	16
6. Economische uitgangspunten voor de rentabiliteit	16
6.1 Energie inkoop en verkoop	16
6.2 Investering en onderhoudskosten	16
6.3 Subsidies.....	16
7. Berekeningsmethodiek en gevoeligheden	16
7.1 Berekeningsmethodiek Cogen Master interactive	16
7.2 Berekening rentabiliteit	16
7.3 Geanalyseerde gevoeligheden	16
8. Resultaten rentabiliteitsberekening	16
8.1 Samenvatting resultaten	16
8.2 Succesfactoren voor de ORC	16
9. Marktpotentieel, een eerste verkenning	16
9.1 Glastuinbouw.....	16
9.2 Gebouwcomplexen	16
9.3 Industriële bedrijven.....	16
9.4 Mogelijke toepassingsvelden buiten warmte/kracht	16
9.5 Groene elektriciteit.....	16
9.6 Conclusie marktpotentieel.....	16
10. Energie en milieuvoordeel ORC	16
11. Conclusies en aanbevelingen	16

Bijlagen

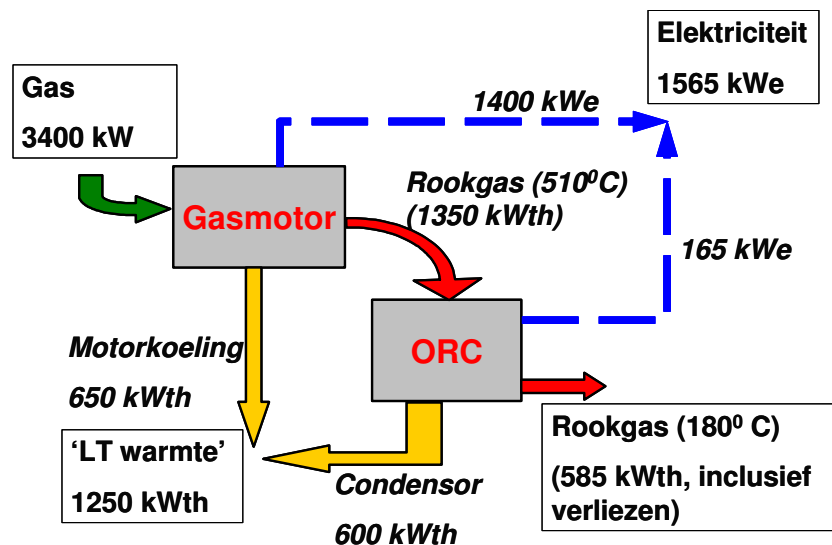
- A. Aansturingmogelijkheden Cogen Master interactive
- B. Afnameprofielen sectoren
- C. Resultaten en gevoeligheden casus tuinbouw 2 ha
- D. Resultaten en gevoeligheden casus tuinbouw 3 ha
- E. Resultaten en gevoeligheden casus ziekenhuizen
- F. Resultaten en gevoeligheden casus universiteiten
- G. Resultaten casus gasturbine
- H. Principeschema combinatie WK met ORC
- J. Resultaten Cycle Tempo berekeningen

1. Inleiding

In veel sectoren waar warmte/kracht-installaties (WK-installatie) worden toegepast, is de elektriciteitsbehoefte relatief groter dan de warmtebehoefte. Dit heeft tot gevolg dat de WK-installatie minder draaiuren maakt dan gewenst omdat op een zeker moment in de warmtebehoefte voorzien is (al dan niet door warmtebuffering) terwijl er nog wél behoefte aan elektriciteit is. Wordt er op een dergelijk moment toch gekozen voor productie van elektriciteit dan moet de geproduceerde warmte vernietigd worden. Zowel een beperkte bedrijfstijd als warmtevernietiging hebben een negatieve invloed op de rentabiliteit van de WK-installatie. Ook kan een situatie optreden dat de verhouding tussen de warmte- en elektriciteitsbehoefte varieert gedurende het jaar. Er is dan behoefte aan een variabele kracht - warmteverhouding voor een bestaande installatie. Doorgaans is een verhoging gewenst van het elektrisch rendement ten koste van het thermisch rendement.

Een Organic Rankine Cycle (ORC) is een manier om warmte om te zetten in elektriciteit. In plaats van de 'normale' cyclus met water en stoom wordt hier een organisch medium gebruikt. Door de ORC na te schakelen aan een gasmotor of gasturbine kan met de warmte in de uitlaatgassen van de gasmotor extra elektriciteit worden geproduceerd, bij gelijkblijvende brandstofinput.

De firma Tri-O-Gen uit Goor is momenteel in de eindfase van de ontwikkeling van een ORC-systeem met een High Speed Turbo Generator (HTG). De ORC levert 175 kWe bruto (ca. 163 kWe netto) en is geschikt om na te schakelen aan gasmotoren van 1200 tot 1400 kWe of gasturbines van 500-800 kWe. Het huidige ontwerp van de ORC heeft ca. 700 kWth warmte-input nodig en koelt de rookgassen af tot een temperatuur van 180° C. Een prinsipeschema van de combinatie van de ORC met een WK is gegeven in Figuur 1 hieronder.



Figuur 1. Prinsipeschema van de combinatie van een WK met een ORC met indicatieve energiestromen.

Eind 2004 verwacht Tri-O-Gen een ORC-systeem te beproeven met behulp van een praktijkproef bij een installatie op stortgas. Hierbij is er een zeer constant aanbod van (afval)warmte, waardoor een maximaal aantal draaiuren kan worden gemaakt. Voor 2005 heeft Tri-O-Gen meerdere demonstratieprojecten gepland.

Voor de ORC is belangrijk om na te gaan of een ORC in combinatie met een WK rendabel kan worden toegepast in bepaalde sectoren. Tri-O-Gen heeft daarom aan Cogen Projects, Gasunie Research, TU - Delft en V-Bèta de opdracht gegeven om dit voor de meest kansrijke doelgroepen te inventariseren. Deze inventarisatie behelst:

- De warmtetechnische - en installatietechnische mogelijkheden en risico's voor het toepassen van een ORC
- De economische haalbaarheid
- Het marktpotentieel voor de ORC

De opdracht wordt ondersteund door Senter en het Productschap Tuinbouw.

Kansrijke doelgroepen hebben voor de daar toe te passen WK een grote elektriciteitsvraag t.o.v. de warmtevraag en een hoge bedrijfstijd. De eerste sectoren waaraan gedacht wordt zijn:

- Zorgsector (ziekenhuizen en verpleeghuizen)
- Glastuinbouw met belichte teelten
- Universiteiten
- Hotelbranche
- Industrie

Deze haalbaarheidsstudie vormt de schakel tussen de praktijkproef met de Tri-O-Gen ORC bij een stortgas installatie (2004) en een demonstratie van het systeem bij één of meerdere sectoren die in deze studie onderzocht worden (2005).

Dit rapport is als volgt opgebouwd.

Hoofdstuk 2 (door Cogen Projects) betreft de opzet van de haalbaarheidstudie. Hier worden beschreven: te beschouwen sectoren, doelen van de studie, gebruikte software en geplande resultaten

Hoofdstuk 3 (door V-Bèta) is een beschrijving van het thermodynamische principe van de ORC en geplande toepassingen

Hoofdstuk 4 (door Cogen Projects) beschrijft de energetische kenmerken van de beschouwde sectoren en de conclusies hierover.

Hoofdstuk 5 (door TU Delft) geeft een beschrijving van de simulaties van de thermodynamische eigenschappen met Cycle Tempo.

Hoofdstuk 6 (door Cogen Projects) geeft de economische uitgangspunten die gebruikt zijn voor de bepaling van de rentabiliteit

Hoofdstuk 7 (door Cogen Projects) beschrijft de rekenmethodiek voor bepaling van de rentabiliteit en geeft een toelichting van de geanalyseerde gevoeligheden.

Hoofdstuk 8 (door Cogen Projects) beschrijft de resultaten van de rentabiliteitsberekening met Cogen Master interactive. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn opgenomen in de bijlagen.

Hoofdstuk 9 (door Cogen Projects en Gasunie) betreft de bepaling van het marktpotentieel voor de combinatie van de ORC met een WK

Hoofdstuk 10 (door Cogen Projects en V-Bèta) geeft de voordelen voor het primair energieverbruik en de daarmee samenhangende milieuvoordelen.

Hoofdstuk 11 vat de studie samen met de conclusies en aanbevelingen

2. Opzet haalbaarheidsstudie

De ORC - studie onderzoekt de (warmte)technische toepasbaarheid, de economische haalbaarheid en marktpotentieel. Hierbij wordt primair gekeken naar de volgende doelgroepen:

- Hotels
- Ziekenhuizen
- Verpleeghuizen
- Tuinbouw bedrijven (belichte teelten)
- Universiteiten

De doelen van het project zijn het vaststellen van:

1. De prestaties bij vollast en deellast van de combinatie van een ORC met een gasmotor of gasturbine (op basis van thermodynamische analyse)
2. De technische toepasbaarheid van de Tri-O-Gen ORC in de bestaande (retrofit) en in nieuwbouw situaties bij de bovengenoemde sectoren
3. De economische haalbaarheid van de ORC van de situaties van punt 2
4. De milieuvoordelen van de ORC van de situaties van punt 2
5. De gevoeligheid voor technische en economische uitgangspunten
6. Het marktpotentieel voor de ORC in Nederland
7. De meest kansrijke doelgroep voor het doen van een demonstratieproject

Voor punt 1 worden thermodynamische modellen opgesteld m.b.v. het flowsheetprogramma "CycleTempo". Er worden verschillende combinaties bekeken van representatieve gasmotoren of gasturbines met de ORC en apparatuur voor het gebruik van de warmte. Belangrijke aandachtspunten hier bij: het motorkoelwater, de uitlaatgassen van motoren en gasturbines na gebruik in de ORC verdamper, en de warmte uit de condensor van de ORC. De warmtevraag in de diverse toepassingen kan aanleiding zijn tot aanpassingen in het huidige ORC - systeemontwerp.

De - in CycleTempo - vastgestelde eigenschappen van de WK/ORC combinaties zullen m.b.v. het computerprogramma "Cogen Master interactive" worden gesimuleerd voor de tijdsafhankelijke warmtevraag en elektriciteitsopbrengsten. Hierdoor kunnen de jaarlijkse variabele opbrengsten en kosten worden bepaald, en vervolgens de economische rentabiliteit. (SPOT, 'Simple Pay-Out Time')

Resultaten van de studie geven inzicht in:

- De bedrijfskarakteristieken van de geïntegreerde WK - systemen: gasmotor - ORC en gasturbine - ORC. Deze zijn nog onbekend, maar wel noodzakelijk om een vergelijking mogelijk te maken met andere WK - systemen.
- De technische toepasbaarheid van de ORC in zowel retrofit situaties bij verschillende doelgroepen als ook bij nieuwbouw situaties (met goed op elkaar afgestemde gasmotor - ORC en gasturbine - ORC WK - systemen).
- De haalbaarheid van een nieuw ORC - systeem dat geoptimaliseerd voor het temperatuurniveau van de uitlaatgassen van gasmotoren en gasturbines.
- De economische haalbaarheid van de ORC. Tevens wordt de gevoeligheid voor economische ontwikkelingen gegeven: o.a. MEP - vergoeding, elektriciteitsprijs, gasprijs,. Tevens wordt gekeken naar de gevoeligheid voor risico's m.b.t de technische inpassing.
- Het marktpotentieel in Nederland van de Tri-O-Gen ORC bij bovenstaande doelgroepen en het corresponderende energie - en milieuvoordeel.

De haalbaarheidsstudie vormt onderdeel van het ontwikkelingstraject van de Tri-O-Gen ORC dat er globaal als volgt uit ziet:

1. Prototype wordt getest voor de verificatie van het ontwerp (in Finland en bij Tri-O-Gen in Goor)
2. Praktijkexperiment: prototype wordt in NL geplaatst, nadat performance is vastgesteld (vorige punt). Gaat continue draaien op de warmte van een stortgasfakkel. Tijdplan: plaatsing verwacht eind 2004.
3. Demonstratieprojecten: In 2005 wil Tri-O-Gen besluiten een aantal '0-serie' installaties te plaatsen in verschillende marktgebieden als demonstratieprojecten. Tuinbouw lijkt hiervoor een zeer interessante kandidaat, naast houtverwerking (Finland), olie - en gasmarkt, procesindustrie, etc. De voorbereiding kan vanaf september (na start studie) plaatsvinden.
4. Marketing en productie: Tijdens en na de fabricage van de '0-serie' zal de serieproductie worden opgezet, alsmede een nationaal en internationaal sales- en servicenetwerk.
5. Prijs ORC: Na de '0-serie' zal de verkoopprijs zodanig zijn, dat de IRR minimaal 15% zal bedragen en de terugverdientijd maximaal 4 jaar. Voor de '0-serie' dienen per installatie afspraken te worden gemaakt met subsidieverleners; leaseconstructies zijn ook mogelijk.

Met deze haalbaarheidsstudie wordt de keuze voor een demonstratie van het systeem bij een of meerdere van de te onderzoeken doelgroepen voorbereid.

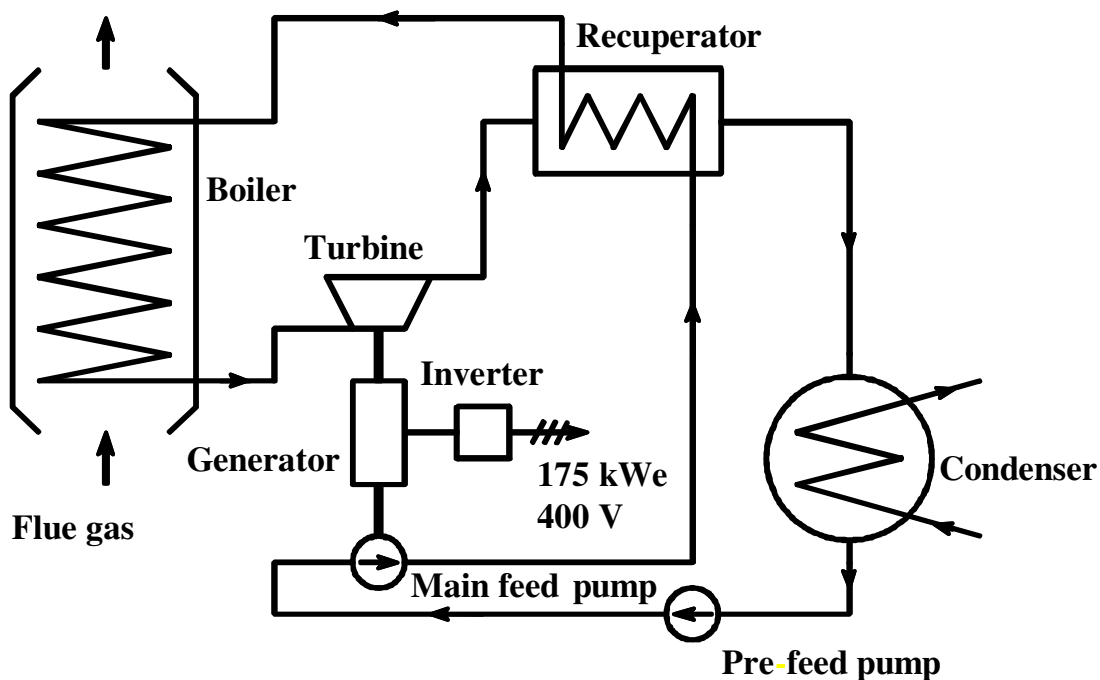
3. Werkingsprincipe ORC/Technologie

3.1 Het Tri-O-Gen ORC concept

De Organic Rankine Cycle (ORC) is een techniek om laagwaardige warmte in elektriciteit om te zetten met behulp van een daarvoor geschikt kringproces. Met de Hermetic Modular High Speed technologie opent Tri-O-Gen nieuwe mogelijkheden voor de ORC techniek. Door montage van turbine, generator en vloeistofpomp op één as en in één huis kan er geen werkmedium naar buiten treden. Op basis van de standaard turbogenerator - module van 175 kWe, kunnen installaties van 175 tot meer dan 1200 kWe gebouwd worden door toepassing van een of meerdere modules.

Het principe van dit ORC systeem is weergegeven in Figuur 2: uitlaatgassen van motoren of gasturbines, de verbrandingsgassen van de verbranding van bio - of restbrandstoffen of fluïda met restwarmte uit industriële processen worden door een verdamper geleid. Het vloeibare werkmedium (tolueen) verdampt bij een druk van ca 32 bar. De onstane licht oververhitte tolueendamp expandeert in de turbine, die rechtstreeks een hoogtoeren generator aandrijft. Het gas wordt na expansie in een recuperator verder afgekoeld in tegenstroom met het vloeibare tolueen dat naar de verdamper stroomt. Vervolgens wordt het zo afgekoelde gas in een condensor vloeibaar gemaakt. Een op de as van de turbogenerator gemonteerde pomp brengt dan de vloeistof weer op druk. Via de recuperator stroomt het naar de verdamper, waarna de gehele cyclus weer opnieuw doorlopen wordt. Afhankelijk van de temperatuur in verdamper en condensor is het maximale rendement van het ORC proces meer dan 20 %. Tolueen is chemisch stabiel tot boven 500 °C, terwijl de veiligheidsklasse vergelijkbaar is met die van gasolie.

ORC proces-schema

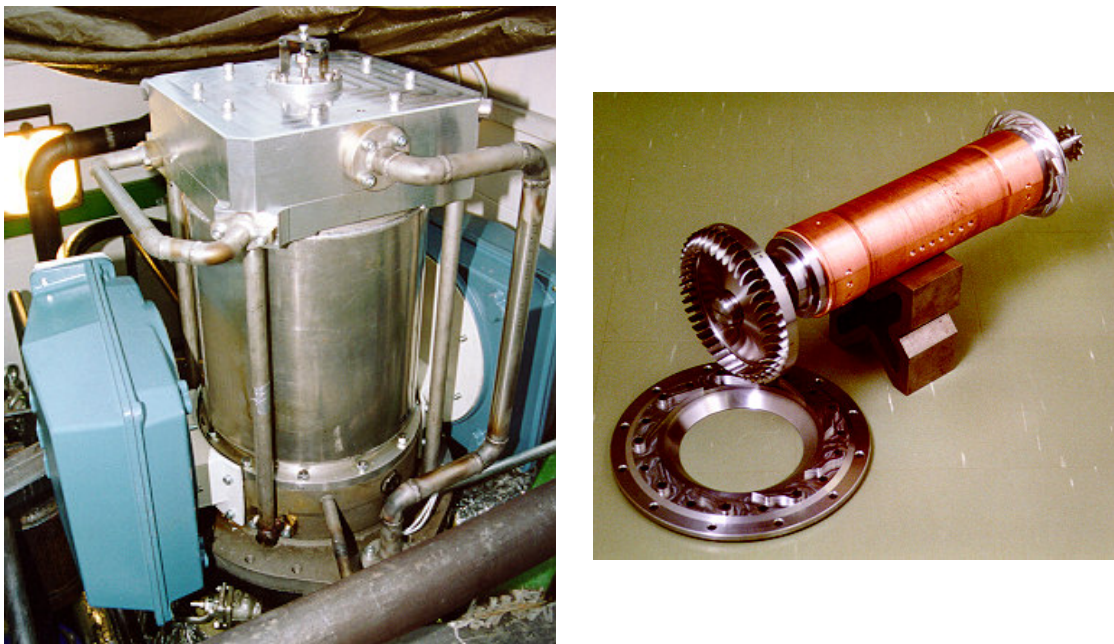


Figuur 2. Het ORC processchema

3.2 De HTG: High Speed Turbo-Generator

De HTG bestaat uit de turbine, de generator en de pomp, die samen op één as in een hermetisch gesloten huis gemonteerd zijn. Er zijn geen asdoorvoeringen en er is geen tandwielkast. De verbindingen met het systeem worden alleen gevormd door kabels voor de elektriciteit en flensverbindingen voor het werkmedium. Het werkmedium toluëen wordt in vloeibare vorm gebruikt om de lagers te smeren. Door het hermetisch gesloten ontwerp blijft het door de lagers verbruikte toluëen binnen het systeem. Door het hoge toerental (ca 28.000 rpm) kunnen kleine, goedkope en zeer efficiënte (het turbine rendement is > 80 %) turbogeneratoren worden ontworpen. De afmetingen van de HTG bedragen ca. 0,5 m bij 1 m. De verwachte levensduur is meer dan 100.000 uur. Eenmaal per 40.000 draaiuren vindt inspectie en eventueel revisie plaats.

De HTG is een Finse (gepatenteerde) vinding waarop Tri-O-Gen B.V. de exclusieve wereldwijde licentierechten heeft verworven. Tri-O-Gen wil voorlopig standaardiseren op één type turbogenerator van 175 kWe. De generatorsets kunnen eenvoudig uitgewisseld worden. Bij meerdere HTG's in een installatie kan dat terwijl de overige doordraaien. Met dit "plug and play" onderhoudsconcept kan een zeer hoge beschikbaarheid worden gegarandeerd. Figuur 3 hieronder toont het HTG prototype en de rotor.



Figuur 3. Het HTG prototype en de rotor

3.3 De Tri-O-Gen ORC package

De ORC zal als package geleverd worden. De packages zullen volledig (af fabriek) gemonteerd naar de locatie worden getransporteerd. De afmetingen komen overeen met die van standaard transport containers. (Zie foto prototype op testlocatie in Finland, Figuur 4)



Figuur 4. prototype op testlocatie in Finland

3.4 Toepassingen

De Tri-O-Gen ORC zal het eerst toegepast worden bij biogas- en stortgasinstallaties. De kwaliteit van de brandstof en het feit dat er een overschot is aan (afval) warmte maakt de ORC uitermate geschikt voor de opwekking van extra groene stroom.

Een volgende toepassing ligt bij bestaande en nieuwe warmtekracht installaties, waarbij de rookgaskoeler vervangen wordt door de verdamer van de ORC. Het elektrisch vermogen kan zo met 5 tot 20 % verhoogd worden, zonder extra brandstofkosten en bij variërende warmtelevering. Daardoor kan het aantal economisch verantwoorde draaiuren per jaar aanzienlijk toenemen.

4. Voorbereiding en uitgangspunten beschouwde casussen

Voor de eerste beoordeling van de sectoren is gebruik gemaakt van Cogen Master interactive (CMI, ontwikkeld door Cogen Projects). Er zijn goede ervaringen met CMI voor het analyseren van de inzet van een WK-installatie in utiliteit - en ziekenhuisbranche. Het programma is voorzien van een speciale tarievenmodule met daarin de meest recente tarieven voor gas en elektriciteit en een aparte rekenmodule voor (economische) rentabiliteit.

4.1 Inventarisatie gebruikte gegevens

De sectoren in de haalbaarheidsstudie worden gekarakteriseerd door de onderstaande gegevens:

1. De consumptie van gas en elektriciteit per maand en per jaar
2. De huidige energiesituatie (aansturing WK, temperatuur van het warmtenet)
3. De karakteristieken van de geïnstalleerde WK-installatie (elektrisch & thermisch vermogen)

Deze gegevens worden hieronder toegelicht.

Consumptie van gas en elektriciteit per maand en per jaar

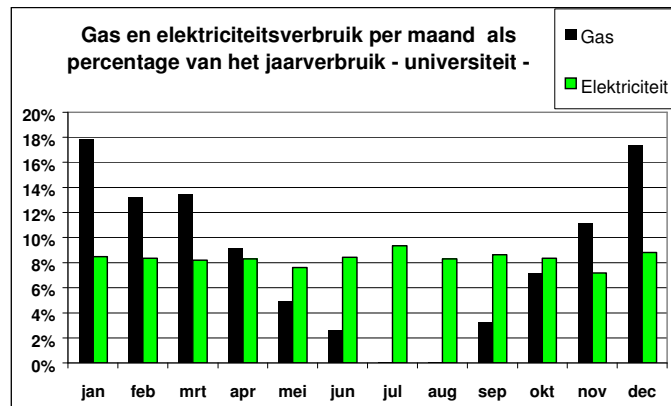
Voor de verschillende sectoren is het verbruik van gas en elektriciteit geanalyseerd. Hiermee is het verbruik bepaald voor iedere kalendermaand. Het elektriciteit - en gasverbruik wordt voor iedere maand opgegeven als het percentage van het totale jaarverbruik. Als de percentages opgeteld worden bedraagt het totaal van de percentages 100%.

Voor de elektriciteitsinkoop is onderscheid gemaakt tussen de afname tijdens plateau - en daluren¹. Voor de meeste sectoren is de verhouding tussen de afname van kWh's tijdens plateau – en daluren gedurende het jaar constant. Daar waar nodig wordt per maand onderscheid gemaakt voor de verhouding. De afnamepiek voor elektriciteit is van belang omdat dit een belangrijke kostenpost is in de transporttarieven en daarmee bijdraagt bij een juiste bepaling van de economie van de referentiesituatie.

Met de jaarverbruiken voor elektriciteit en gas wordt een verhouding tussen elektriciteit en gas bepaald in $\text{kWh}_e/\text{m}^3_{\text{gas}}$. Deze verhouding dient als handvat om de sectoren onderling te kunnen vergelijken.

Figuur 5 toont als voorbeeld het gas en elektriciteitsverbruik per maand van een universiteit. In dit voorbeeld is de gasafname tijdens de zomermaanden nihil. De inkoop van elektriciteit is vrijwel constant gedurende het jaar.

¹ De plateau-uren zijn van 7.00 uur tot 23.00 uur, exclusief weekeinden. Daluren zijn van 23.00 uur tot 7.00 uur én alle uren in het weekend. De elektriciteitsinkoop uit het net is tijdens plateau - uren duurder dan tijdens daluren. Zie ook hoofdstuk 6 (economische uitgangspunten)



Figuur 5. Voorbeeld van het jaarverbruik voor gas en elektriciteit

Voor het gasverbruik dient onderscheid gemaakt te worden tussen gas voor stoomopwekking (temperatuur > 110⁰ C) en overige toepassingen, waar warmte met een lagere temperatuur wordt gebruikt. De warmte uit een WK/ORC systeem zal namelijk alleen ingezet kunnen worden voor toepassingen waarbij geen stoom wordt opgewekt. Gasinkoop voor stoomopwekking dient niet meegerekend te worden.

De huidige energiesituatie

Voor bepaling van de uitgangspunten voor de inpassing van de gebruikte gasmotor zijn de volgende vragen beantwoord:

- Wat zijn gangbare WK-installaties in de sectoren?
- Op welke temperatuur wordt de warmte geleverd?
- Op welke wijze wordt de installatie aangestuurd?

De temperatuur van de warmtelevering is van belang voor de ORC. Er zijn - globaal - twee temperaturen waarop warmte wordt geleverd, te weten: op lage temperatuur (LT) bij ca. 50⁰C en op hoge temperatuur (HT) bij ca. 90⁰ C. In ziekenhuizen en universiteiten is alleen een HT warmte net aanwezig. In de tuinbouw komen ook LT – netten voor. Met name voor nieuwbouwprojecten is dit in de tuinbouw standaard.

Voor de industrie is uitgegaan van een gasturbine, voor de overige sectoren is een gasmotor gekozen,

De aansturing van de WK installatie bepaalt hoe een installatie wordt ingezet en of er wel of geen warmte wordt vernietigd in de huidige situatie. Zo kan een WK bijvoorbeeld aangestuurd worden op de warmtebehoefte; tekort aan elektriciteit wordt dan door inkoop gedekt en eventuele extra elektriciteit kan aan het net geleverd worden. Een van de andere opties is aansturen op elektriciteitsvraag met al dan niet de optie van warmtevernietiging. Een uitgebreide lijst van aansturingmogelijkheden is als bijlage A bijgevoegd.

Karakteristieken van de geïnstalleerde WK-installatie

De WK's die gebruikt worden in deze studie worden gekarakteriseerd door de volgende 3 kenmerken

- Elektrisch vermogen aan de klemmen van de generator (kWe)
- Thermisch vermogen dat geleverd kan worden (KWth)
- Gasverbruik (m³/uur)

Met behulp van het programma CycleTempo worden de benodigde bedrijfskarakteristieken bepaald van de combinatie van een ORC met een WK-gasmotor. Bij het opge-

ven van de motor karakteristieken is rekening gehouden met het temperatuurniveau waarop de gebruiker de warmte nodig heeft. Zo is de warmte uit de condensor van een ORC met LT condensor² niet inzetbaar in een HT net. Deze warmte wordt dan ook niet meegerekend als nuttige warmteoutput voor de simulatie.

4.2 Gegevens per sector

Ziekenhuizen

Van een aantal ziekenhuizen is het energieverbruik per maand geanalyseerd. Er is in detail gekeken naar de gasinkoop ten behoeve van stoomopwekking voor luchtbehandeling. Omdat stoom niet rendabel kan worden gemaakt met een gasmotor - WK moet deze gasvraag voor stoom apart in beeld gebracht worden bij de uitgangpunten. In de berekeningen zal alleen met de warmtevraag worden gerekend die nu door de warmwaterketels wordt ingevuld. Dit resulteert in de volgende energieverbruikgegevens voor een standaardziekenhuis:

Ziekenhuis	
Elektriciteitsvraag ziekenhuis	10.584.151 kWh
Percentage tijdens plateau-uren	57.2%
Percentage tijdens dal-uren	42.8%
Maximale afnamepiek elektriciteit	2200 kW
Warmtevraag ³ ziekenhuis	1.268.000 m ³
Stoomvraag ⁴	758.783 m ³
Verhouding elektriciteit/gas (excl. stoom)	8,3 kWh/m ³
Verhouding elektriciteit/gas (incl. stoom)	5 kWh/m ³
Gangbare W/K gasmotor	GeCat G3512 (2 motoren)
Elektrisch vermogen (per motor)	685 kWe
Thermisch vermogen	852 kWth
Gasverbruik per uur	211 m ³ /uur
Ketelrendement (o.w.)	85%
Inpassing in warmtenet	Hoog temperatuur
Optimale aansturing WK	
Tijdens daluren	Op interne elektriciteitsvraag, zonder warmtevernietiging
Tijdens plateau-uren	Op interne elektriciteitsvraag met eventueel warmtevernietiging

Tabel 1. Gegevens ziekenhuis

Voor de energieafname is uiteindelijk uitgegaan van een bestaand ziekenhuis in Arnhem. Voor elektriciteit geldt een behoorlijk constante afname gedurende het jaar. Het lijkt waarschijnlijk dat elektriciteitsafname in de zomer (voor koeling) in balans is met de elektriciteitsafname in de winter (voor verlichting en circulatiepompen of ventilatoren ten behoeve van verwarming).

Bij de bepaling van de gasinkoop ten behoeve van warmteopwekking is tevens gecontroleerd of de warmte niet vernietigd werd.

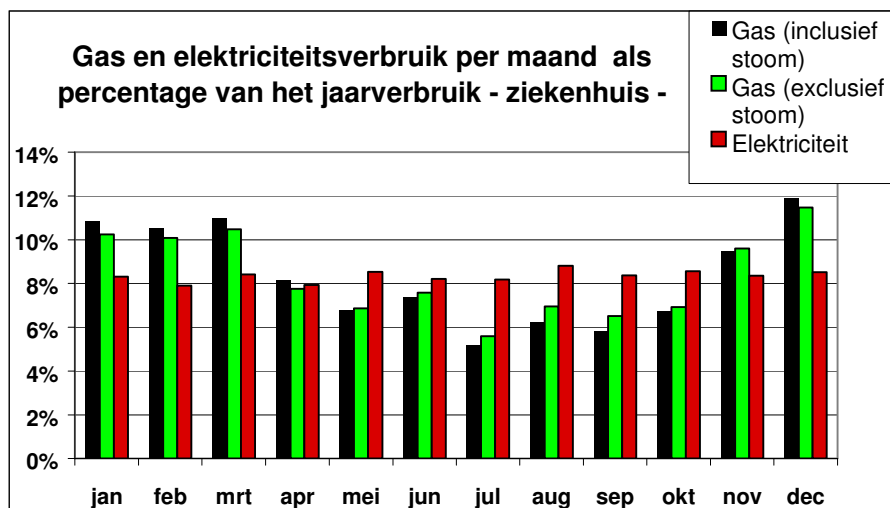
² De standaard ORC is uitgevoerd met een LT condensor voor maximaal elektrisch vermogen. Het gebruik van een HT condensor betekent een lager elektrisch vermogen.

³ Uitgaande van warmteopwekking met warmwater ketels.

⁴ Uitgaande van stoomopwekking met stoomketels.

Voor de keuze van de “bestaande” WK - gasmotor is bekeken wat in een aantal ziekenhuizen staat opgesteld. Tevens is bekeken wat bij de aangenomen verbruiken en verbruikspatronen een goede dimensionering van een WK - installatie zou zijn. Vervolgens is gekozen voor de in dat vermogenssegment meest voorkomende merk en type gasmotor, op basis van CBS gegevens. De gegevens van deze casus komen overeen met een werkelijke situatie bij een ziekenhuis.

De resultaten van de energie-inkoop voor een ziekenhuis zijn in Figuur 6 weergegeven.



Figuur 6. Gas en elektriciteitsverbruik van een ziekenhuis per maand als percentages van het jaarverbruik

Belichtende glastuinders

Van verschillende belichte teelten zijn de maandverbruiken voor energie verzameld en vergeleken. Daarbij is tevens gebruik gemaakt van belichtingschema's, CO₂-schema's, en andere informatie die al eerder gebruikt zijn voor de advisering van de glastuinbouw. Uiteindelijk is gekozen voor een “standaard” verbruik op basis van de belichte rozenteelt. De warmtevraag, belichtingspatronen en CO₂ - behoefte zijn hierop gebaseerd. Daarbij is de warmte die ontstaat als gevolg van de belichting in de netto - warmtevraag verdisconteerd.

De tuinbouwsector is de enige sector waar sprake is van de combinatie van een hoog - en laag temperatuurnetwerk. Dit houdt in dat er op beide temperaturen warmte wordt geleverd waarbij de LT warmte uit de rookgas condensor en de tussenkoeling van de turbocharger wordt geleverd. Bij naschakeling van een ORC met een LT condensor wordt extra LT warmte geproduceerd. Er is aangenomen dat het LT net voldoende capaciteit heeft om alle LT warmte die uit de ORC komt in de kas te distribueren.

In de glastuinbouw is nooit echt sprake van een “standaard” afname. De teelten onderling verschillen zeer sterk in warmteafname en in lichtbehoefte. Zelfs binnen één type teelt kan sprake zijn van andere afnamepatronen voor een ander type bloem. Het is dus moeilijk om van een standardsituatie te spreken.

De volgende energieverbruikgegevens zijn gehanteerd voor een kas van 2 hectare en een kas 3 hectare.

Glastuinbouw belichte teelt	
Teelttype	Roos
Oppervlakte	2 hectare / 3 hectare
Elektriciteitsvraag belichte tuinders	6.639.854 kWh / 9.959.376 kWh
Percentage plateau	Zie tabel 3
Percentage dal	Zie tabel 3
Maximale afnamepiek elektriciteit	1594 kW / 2391 kW (voor ca. 8000 lux)
Warmtevraag volgens de GLAMI ⁵ norm (na correctie voor warmte uit belichting)	631.342 m ³ / 947.013 m ³
Verhouding elektriciteit/gas	10,5 kWh/m ³
Gangbare W/K gasmotor	GeCat G3512 (2 motoren) met rookgasreiniger
Elektrisch vermogen (per motor)	738 kWe
Thermisch vermogen	1113 kWth
Gasverbruik per uur	220 m ³ /uur
CO ₂ index	28%
Buffervolume	ca. 50.000 kWh-th / 75.000 kWh-th (HT warmte) (voldoende voor ca.12 uur WK-warmte)
Ketelrendement (o.w.)	95%
Inpassing in warmtenet	combinatie van hoge/lage temperatuur
Optimale aansturing WK	
Tijdens daluren bij belichting	Op interne elektriciteitsvraag, eventueel warmtevernietiging
Tijdens plateau-uren bij belichting	Op interne elektriciteitsvraag, eventueel warmtevernietiging
Van mei tot en met september van 07:00 tot 18:00 t.b.v. CO ₂ -dosereren	WK aan als deze nog niet aan is t.b.v. belichting

Tabel 2. Gegevens Glastuinbouw belichte teelt

De afname van elektriciteit en de verdeling tussen plateau - en daluren verschilt zeer sterk per maand. Voor de verdeling tussen plateau en daluren is hieronder een overzicht gegeven

maand	jan	feb	mrt	apr	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
Plateau%	46,5	46,5	42,3	33,7	22,7	2,3	2,3	29,5	33,7	38,5	42,3	46,5
Dal %	53,5	53,5	57,7	66,3	77,3	97,7	97,7	70,5	66,3	61,5	57,7	53,5

Tabel 3. Verdeling tussen afname tijdens plateau - en daluren

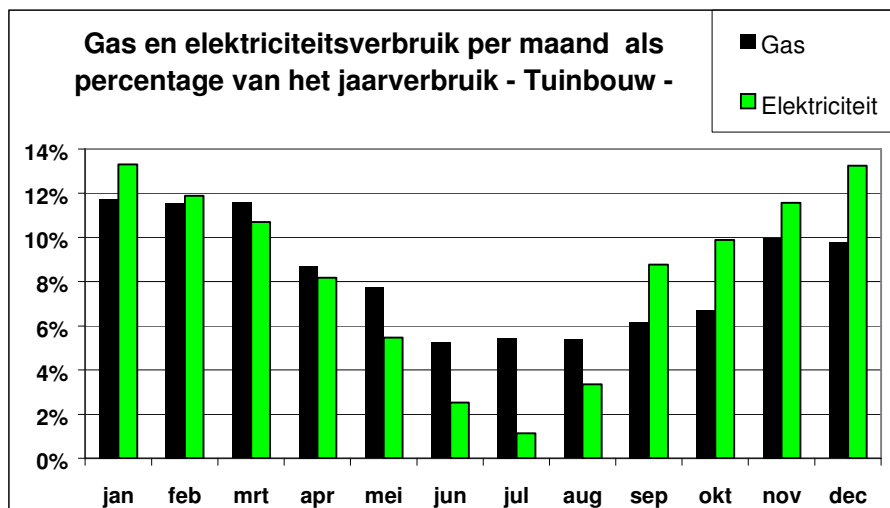
Het elektriciteitsverbruik is gebaseerd op de afname van elektriciteit voor belichting. De gasafname is gebaseerd op de warmtebehoefte van een rozenteler. Bij omrekening naar de gasafname is rekening gehouden met de warmteproductie door de lampen tij-

⁵ GLAMI: Afkorting voor het convenant GLAstuinbouw en Mllieu. Deze geeft o.a. normen voor de hoeveelheid energie die een teelt behoort te gebruiken

dens belichting. Ongeveer 60% van het lampvermogen komt weer vrij als warmte in de kas.

Bij de gasafname is geen rekening gehouden met de behoefte aan CO₂ gedurende de maanden mei tot en met september. Een tuinder zal in deze periode additioneel CO₂ doseren in de kas omdat het gewas dan beter groeit. Dit gebeurt meestal door de ketel te stoken en de rookgassen in de kas te blazen. Dit effect is niet meegenomen in de energetische uitgangspunten. Een WK moet voorzien zijn van een rookgasreiniger om CO₂ te kunnen doseren in de kas omdat anders de rookgassen niet aan de gebruikelijke kwaliteitseisen voldoen. Als de WK in de zomermaanden draait ten behoeve van de CO₂ productie levert de WK de geproduceerde elektriciteit aan het net en is er dus een netaansluiting noodzakelijk. Voor deze studie is aangenomen dat vanaf mei tot en met september de WK gebruikt wordt om CO₂ te doseren in de kas.

Tuinders maken gebruik van warmteopslag tanks ('buffers') om de warmte op te slaan die tijdens het CO₂ doseren ontstaat. De warmte kan dan later ingezet worden tijdens de nacht - en ochtenduren om zo in de warmtebehoefte te voorzien. De tuinder bespaart hiermee op zijn gasinkoop en heeft de mogelijkheid zijn afname voor gas zo regelmatig mogelijk te laten verlopen. In de buffer wordt alleen HT warmte opgeslagen. LT warmte wordt niet opgeslagen in de buffer en maar wordt gelijk gebruikt in de kas. Als er extra LT warmte wordt geproduceerd ten koste van HT warmte betekent dit dat er minder warmte kan worden opgeslagen in de buffer. In de simulaties wordt met dit effect rekening gehouden door het beschikbare buffervolume kleiner te maken.



Figuur 7. Gas en elektriciteitsverbruik van een tuinbouwbedrijf per maand als percentages van het jaarverbruik

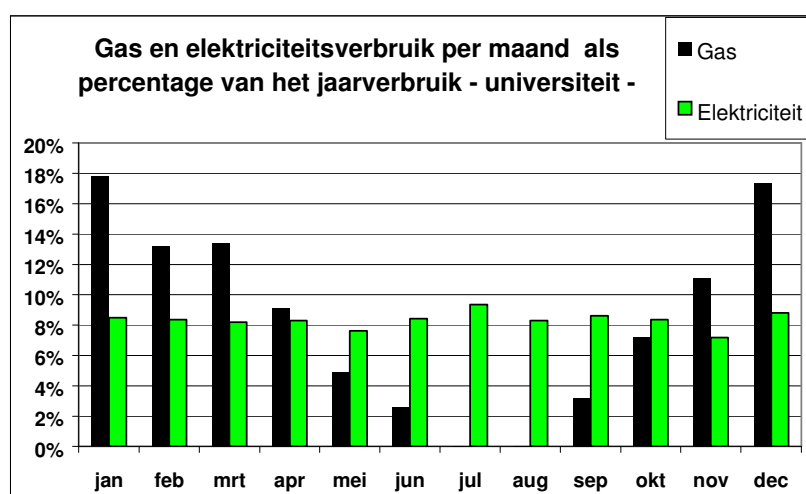
Universiteiten

Voor de universiteiten is de afname van de Technische Universiteit Delft geanalyseerd. Deze universiteit maakt gebruik van een eigen 10 kV ringnet met een aantal transformator stations die voor de koppeling met het openbare net zorgen. Het centrale warmtenet wordt gevoed door ketels en 2 gasmotoren. Na contact met de facilitaire dienst van de TU Delft over het warmtenet en elektriciteitsnet zijn de onderstaande uitgangspunten vastgesteld.

Universiteit	
Elektriciteitsvraag Universiteit	59.100.000 kWh
Percentage plateau	66,5%
Percentage dal	33,5%
Maximale afnamepiek elektriciteit	11.000 kW
Warmtevraag ⁶ ketelhuis universiteit	7.700.000 m ³
Verhouding elektriciteit/gas	7.7 kWh/m ³
Bestaande W/K gasmotor	Brons / MAN v12 20/31 NG
Elektrisch vermogen (per motor)	707 kWe
Thermisch vermogen	1162 kWth
Gasverbruik per uur	236 m ³ /uur
CO ₂ index	30%
Ketelrendement (o.w.)	87%
Inpassing in warmtenet	Hoge temperatuur
Optimale aansturing WK	
Tijdens daluren	Op warmtevraag
Tijdens plateau-uren	Op warmtevraag

Tabel 4. Gegevens Universiteiten

De energieafname over het hele jaar is hieronder weergegeven. De figuur maakt duidelijk dat er in de zomermaanden vrijwel geen gas wordt afgenomen. De elektriciteitsafname is gedurende het gehele jaar vrijwel constant.



Figuur 8. Gas en elektriciteitsverbruik per maand als percentage van het jaarverbruik van een universiteit

⁶ Uitgaande van warmteopwekking met warmwater ketels.

Hotels

Voor hotels zijn de volgende energieverbruikgegevens verzameld.

Hotel	
Elektriciteitsvraag groot hotel	3.600.000 kWh
Percentage plateau	53,7%
Percentage dal	46,3%
Maximale afnamepiek elektriciteit	627 kW
Warmtevraag groot hotel	900.000 m ³
Verhouding elektriciteit/gas	4 kWh/m ³
Gangbare WK gasmotor	Waukesha L36; 446 kWe
Ketelrendement (o.w.)	90%
Inpassing in warmtenet	Hoog temperatuur

Tabel 5. Gegevens Hotels

Op basis van de gegevens die voor de hotelbranche zijn verzameld blijkt dat het niet mogelijk is om de ORC in zijn huidige in deze sector te plaatsen. Dit komt doordat het thermische vermogen van een eventuele gasmotor te klein is. Deze sector wordt in deze studie verder buiten beschouwing gelaten.

Verpleeghuizen

Voor verpleeghuizen zijn de volgende energieverbruikgegevens zijn gehanteerd

Verpleeghuis	
Elektriciteitsvraag verpleeghuis	1.260.000 kWh
Percentage plateau	58,3%
Percentage dal	41,7%
Maximale afnamepiek elektriciteit	334 kW
Warmtevraag verpleeghuis	350.000 m ³
Verhouding elektriciteit/gas	3,6 kWh/m ³
Gangbare WK gasmotor	MAN E2842LE; 313 kWe
Ketelrendement (o.w.)	90%
Inpassing in warmtenet	Hoog temperatuur

Tabel 6. Gegevens verpleeghuizen

Op basis van de gegevens die voor de verpleeghuizen zijn verzameld blijkt dat het niet mogelijk is om de ORC in zijn huidige in deze sector te plaatsen. Dit komt doordat het thermisch vermogen van de eventuele gasmotor te klein is. Deze sector wordt verder buiten beschouwing gelaten in de verdere studie.

De gasturbine

Als vervanging voor de hotelbranche en verpleeghuizen is gekozen voor een beoordeling van de combinatie van een ORC met een kleine gasturbine. Voor de simulatie wordt er vanuit gegaan dat de energiebehoefte (elektriciteit en warmte) hier groter is dan de productie van warmte en elektriciteit en warmte van de GT/ORC combinatie. De gasturbine draait in de simulatie jaarrond (8760 uur) en alle warmte en elektriciteit worden door de opwekker volledig zelf gebruikt. De gebruikte gasturbine voor de simulaties met CMI is een Pratt & Whitney, ST6L-813.

De relevante gegevens zijn:

Gasturbine	
Elektriciteitsvraag	12.000.000 kWh
Percentage plateau	47.5%
Percentage dal	52,5%
Maximale afnamepiek	1.500 kW
Warmtevraag ⁷ ketelhuis	3.000.000 m ³
Verhouding elektriciteit/gas	4 kWh/m ³
Bestaande gasturbine	Pratt & Whitney, ST6L-813
Elektrisch vermogen (per motor)	848 kWe
Thermisch vermogen	997 kWth
Gasverbruik per uur	370 m ³ /uur
CO ₂ index	22%
Ketelrendement (o.w.)	80%
Inpassing in warmtenet	Hoge temperatuur
	(als voedingwatervoorwarmer)
Optimale aansturing WK	
Tijdens daluren	Altijd aan
Tijdens plateau-uren	Altijd aan

Tabel 7. Gegevens Gasturbine

Er is aangenomen dat de gekozen gasturbine onderdeel is van een grotere utilityvoorziening. De energie verbruikscijfers voor warmte en elektriciteit van de 'basecase' zijn dusdanig gekozen dat de productie van de WK circa 65% van de totale elektriciteitsvraag dekt en circa 80% van de warmtevraag. Hierdoor is er voldoende extra elektriciteitsbehoefte om de extra elektriciteitsproductie bij de combinatie van de ORC met WK voor eigen gebruik in te zetten. Tevens nemen we aan dat alle elektriciteit uit de WK of WK/ORC in aanmerking komt voor MEP subsidie.

In deze studie zijn drie varianten van de gasturbine nader bekeken.

1. Variant 1 gaat er vanuit gegaan dat de warmte van 90⁰ C uit de WK of WK/ORC nuttig ingezet kan worden (bijvoorbeeld ten behoeve van voorwarming van het voedingswater). De warmte die de ORC gebruikt voor de productie van elektriciteit moet dus met een ketel opnieuw worden opgewekt.
2. Variant 2 betreft het (theoretische) geval dat er geen nuttige aanwending bestaat voor de door de gasturbine geproduceerde warmte. De warmte die de ORC gebruikt, heeft hier dan geen waarde.
3. Variant 3 betreft 50% van de warmte uit de gasturbine nuttig ingezet kan worden; 50% van de warmte die de ORC gebruikt, moet dan dus met een ketel worden opgewekt.

Van de drie bovenstaande varianten is alleen voor variant 1 een simulatie uitgevoerd in CMI. Aan de hand van de uitkomsten hiervan is de rentabiliteit bepaald voor de drie varianten.

⁷ Uitgaande van warmteopwekking met warmwater ketels.

4.3 Conclusies inventarisatie

Het energieverbruik in de hotelbranche en in verpleeghuizen is te klein om een ORC in combinatie met een WK gasmotor te kunnen plaatsen. Dit komt doordat de gasmotor doorgaans te klein zal zijn om in de warmtebehoefte van een ORC te voorzien. Daarom is gekozen op deze twee sectoren niet nader te beschouwen en in plaats daarvan een casus met een gasturbine te analyseren. Er is gekozen voor de combinatie van één gasturbine met twee nageschakelde ORC installaties.

5. Modelling en simulatie ORC met Cycle Tempo

Een van de hoofddoelen van deze studie was het ontwerpen van een steady-state model van de beschreven ORC installatie. Het doel van het model is het voorspellen van het gedrag van de installatie in bedrijfspunten die afwijken van de nominale last (deellast situatie), evenals om een overzicht te verkrijgen van de totale energiebalans van de gasmotor/gasturbine-ORC combinatie. Dit overzicht zal in het vervolgtraject nodig zijn om de economische berekeningen uit te kunnen voeren.

Het model werd opgesteld met behulp van het softwarepakket Cycle-Tempo®, release 5.0, build 466⁸. Dit pakket is oorspronkelijk ontwikkeld en geoptimaliseerd voor het modelleren van stoomcentrales en STEG systemen, maar is in de loop der jaren uitgebreid met nieuwe stoffeigenschappen - definities en berekeningsmodules, waardoor meer energiesystemen gesimuleerd kunnen worden, waaronder de ORC. De beschikbaarheid van de stoffeigenschappen van toluen, en de grondige kennis van het pakket binnen de sectie ET waren doorslaggevend voor de keuze van het simulatieprogramma.

Allereerst zal de ontwikkeling van het model van de ORC aan de hand van een base-case specificatie worden beschreven (ontwerpberekening). Daarna volgen de wijzigingen in het model die nodig zijn om verschillende bedrijfssituaties te simuleren (deellast berekening). Tenslotte worden de simulatieresultaten van verschillende gasmotor/gasturbine combinaties met de ORC besproken.

De figuren en tabellen waarnaar verwezen wordt, zijn opgenomen in bijlage J.

5.1 Ontwerpberekening

Het model voor de ontwerpberekening is een doorontwikkeling van het model zoals eerder opgezet door Walter Crommelin. Het uitgangspunt voor de ontwerpberekening was een base case opgesteld door Tri-O-Gen d.d. 10 januari 2003. Op basis van deze gegevens werd de input voor het model bepaald. Het processchema staat in figuur J1, de invoer voor deze berekening staat in tabel J1.

Dit model komt vrijwel geheel overeen met de base case. Het enige verschil treedt op in de condensor en wordt veroorzaakt door een toluenstroom door de lagers, welke blijkbaar niet in de base case is meegenomen. Tevens is in het model een koelwateruittreetemperatuur van 50°C gekozen, terwijl de base case 49.4°C aanneemt. Als de massastroom toluen door de lagers op nul wordt gesteld en de koelwateruittreetemperatuur op 49.4°C, dan zijn de resultaten identiek.

Het modelleren van de pompen vereist een nadere uitleg. In het bovengenoemde model zijn de toluenpompen vervangen door een vermogensbron. De berekeningen in de base case zijn gebaseerd op een Fins toluenmodel, waarbij de enthalpie van de vloeistoffase onafhankelijk van de druk wordt verondersteld. Dit resulteert in een nihil pompvermogen en komt natuurlijk niet overeen met de werkelijkheid. Om echter een vergelijking te kunnen maken tussen het model en de base case, worden de pompvermogens van de base case overgenomen en middels een vermogensbron aan de toluenstroom toegevoerd.

⁸ In dit hoofdstuk wordt aan het programma gerefereerd als "CT".

Het ontbreken van de relatie tussen de enthalpie van vloeibaar toluen en de druk is een belangrijke tekortkoming van het Finse toluenmodel bij het modelleren van de ORC. Het bepalen van de pompvermogens is immers essentieel voor het bepalen van de totale energiebalans van de installatie. Daarom is besloten om twee andere routines voor het berekenen van tolueneigenschappen in Cycle-Tempo op te nemen. Dat zijn:

- Thermoprop (Dr. P. Colonna)
- Refprop

In figuur J2 is het aangepaste model weergegeven; de vermogensbronnen zijn vervangen door pompmodellen. De resultaten wijken enigszins af van de resultaten in figuur J1. Dit komt onder andere door een lager berekend vermogen van de hoofdpomp.

Omdat er nu drie modellen beschikbaar zijn om de tolueneigenschappen te bepalen, kunnen de waarden ervan onderling worden vergeleken. Dit zou tot een conclusie moeten leiden, welk(e) model(len) de werkelijkheid het beste benaderen. In tabel J2 staan de temperaturen van de toluenhoofdstroom naast elkaar, en in tabel J3 worden de enthalpieverschillen in de hoofdcomponenten van het systeem vergeleken. In deze vergelijkingsprocedure wordt het turbine vermogen op een gewenst niveau vastgezet (input); de drukken zijn eveneens vastgelegd. De massastroom toluen wordt rechtstreeks uit het turbinevermogen bepaald. De temperaturen worden dan, voor zover niet opgeven in de input, berekend uit de betreffende energiebalansen.

Analyse van de getallen uit bovengenoemde tabellen leert, dat de verschillen tussen het Finse toluenmodel en Thermoprop/Refprop over het algemeen groter zijn dan de verschillen tussen Thermoprop en Refprop onderling. Daardoor lijken de laatstgenoemde twee toluenmodellen beter geschikt voor het modelleren van de toluenkringloop. De belangrijkste reden om het Finse model te laten vallen was echter het ontbreken van de mogelijkheid om het pompvermogen correct te berekenen, zoals reeds besproken. In het vervolg zijn alle besproken simulaties uitgevoerd met Thermoprop toluenmodel, tenzij anders is aangegeven. De reden om Thermoprop te gebruiken was zijn eerdere beschikbaarheid en het correcte functioneren in Cycle-Tempo. Refprop werd pas gedurende het schrijven van dit verslag beschikbaar in Cycle-Tempo, maar was nog niet vrij van bugs. Het verdient echter zeker de aanbeveling om zodra Refprop zijn functionaliteit bereikt heeft, deze ook voor de simulaties te gebruiken. Het heeft te maken met de berekening van de condensor, wat verder in dit verslag wordt uitgelegd.

5.2 Bedrijfssituatie (deellast) berekening

Het model zoals gepresenteerd in figuur J1 is een zogeheten ontwerpmodel. Dat wil zeggen dat er allerlei parameters zijn vastgelegd om daarmee bepaalde karakteristieken van de installatie te kunnen bepalen. Zo is bij voorbeeld voor de boiler een uittree temperatuur van de rookgasstroom opgegeven (zie tabel J1). Deze grootte zal in de praktijk niet worden geregeld en mag daarom niet als input voor het model van de bedrijfssituatie (off-design model) dienen. Echter, door deze waarde aan het ontwerpmodel mee te geven, kan het programma daarmee de karakteristieken van de warmtewisselaar (boiler) uitrekenen. Deze karakteristieken worden vervolgens aan het off-design model doorgegeven.

Ten behoeve van de off-design simulaties is het base case model op enkele punten aangepast. De aanpassingen zijn hieronder opgesomd:

- alle temperaturen en drukken die als input waren opgegeven, zijn losgelaten. Voor geschreven blijven:
 - de temperatuur van de rookgassen van de gasmotor (invoerparameter);

- de intreetemperatuur van het koelwater (invoerparameter);
- de uittreetemperatuur van het koelwater: wordt gecontroleerd door het massastroom koelwater door de condensor aan te passen;
- turbine inlaat temperatuur: wordt gecontroleerd door het massastroom tolueen in de hoofdstroom te variëren;
- de karakteristieken van de recuperator, de boiler en de turbine, welke bepaald zijn in de ontwerpberekening, zijn doorgegeven aan de betreffende componenten;
- de warmtebalans van de boiler wordt in het off-design model samen met de warmtewisselaarkarakteristiek gebruikt om de temperaturen van de afgekoelde rookgasenstroom en van het koude tolueen te berekenen. In het ontwerpmodel wordt de warmtebalans gebruikt om de massastroom rookgas uit te rekenen;
- de warmtebalans van de recuperator wordt in het off-design model samen met de warmtewisselaarkarakteristiek gebruikt om de temperatuur van het afgekoelde tolueen en de massastroom tolueen te bepalen. In het ontwerpmodel wordt de warmtebalans gebruikt om de temperatuur van het opgewarmde tolueen uit te rekenen;
- het door de turbine geleverde vermogen wordt nu door het model bepaald, afhankelijk van het mate deellast. In het ontwerpmodel wordt het turbinevermogen opgegeven;
- de hoofdpomp is mechanisch gekoppeld aan de turbine, zoals dat ook het geval is bij de testopstelling.

Tenslotte is de manier waarop de condensor is gemodelleerd, aangepast. Het model van de condensor zoals geïmplementeerd in Cycle-Tempo, moet voor de deellast berekening kunnen beschikken over de transporteigenschappen van het te condenseren medium. Voor water en stoom zijn deze transporteigenschappen beschikbaar. Thermoprop tolueenmodel berekent deze echter niet. Om de condensor toch te kunnen modelleren is er voor de deellast berekening gebruik gemaakt van het flash-heater model. In plaats van het warmtewisselende oppervlak, welke door het condensormodel in ontwerpsituatie wordt berekend, wordt nu gebruik gemaakt van het temperatuurverschil aan de zijde met de hoogste temperaturen, dat wil zeggen het verschil tussen de condensatietemperatuur van het te condenseren medium en de uittredetemperatuur van het koelmedium. Met een in CT geïmplementeerde procedure wordt dit temperatuurverschil omgerekend naar het temperatuurverschil voor de deellast situatie. Met dit temperatuurverschil wordt vervolgens het energiebalans van de flash-heater opgelost.

Het Refprop tolueenmodel beschikt wel over de mogelijkheid om de transporteigenschappen te berekenen. Dat wil zeggen, dat met daarmee het condensormodel ook in deellast situatie kan worden gebruikt en wordt er rekening gehouden met het warmtewisselende oppervlak van het apparaat. Problemen kunnen echter ontstaan op het moment, dat er oververhitte tolueendamp gecondenseerd moet worden. Het condensormodel is niet bedoeld voor het gebruik met een oververhitte damp en zal men dan alsnog op de flash-heater model moeten terugvallen. Het is weliswaar geen normale bedrijfssituatie, maar er dient wel rekening mee worden gehouden.

In figuur J3 staat een schema van het model van de bedrijfssituatie. De bijbehorende output is berekend voor de nominale last (100% deellast). In dit schema is de hoofdpomp nog niet mechanisch aan de turbine gebonden. Dit is gedaan om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de resultaten van de base case en 100% deellast model. Volgens de verwachting zouden de resultaten nagenoeg aan elkaar gelijk moeten zijn. De vergelijking leert, dat de uitkomsten van het deellast model minder dan 0,2% afwijken van de resultaten van de base case. Deze afwijking wordt geaccepteerd.

In de testopstelling wordt de hoofdpomp rechtstreeks door de turbine aangedreven. Om een getrouwe weergave van de werkelijkheid te verkrijgen, wordt dit ook aan het model toegevoegd. Figuur J4 toont het model zoals later gebruikt voor de simulaties.

5.3 Simulaties

Het hiervoor beschreven model vormt een gereedschap waarmee het gebruik van de ORC met verschillende topping cycli gesimuleerd kan worden. De resultaten van de simulaties kunnen inzicht verschaffen in:

- de operationele aspecten van de inpassing van de ORC, vooral bij deellast;
- de economische aspecten (netto elektrisch vermogen en rendement);
- de mogelijkheden / noodzaken om het ontwerp aan te passen.

Aan het begin van het project zijn er een aantal cases gedefinieerd, die gesimuleerd zullen worden. Een overzicht daarvan staat in tabel J4. In de eerste vier gevallen is de topping cyclus een gasmotor en in het laatste geval is het een gasturbine. Tabel J5 geeft een overzicht van de per case uitgevoerde simulaties. Voor elke deellast situatie worden twee condensorcondities bekeken. De nieuwbouw case met een gasturbine wordt alleen in vollast gesimuleerd. Dat levert in totaal 25 simulaties.

Hierna zullen de invoergegevens, de simulaties en de resultaten worden besproken. Dit wordt gedaan aan de hand van de case “glastuinbouw”, maar geldt in principe ook voor andere cases. Een overzicht van de belangrijkste resultaten staat in tabel J6.

De invoer benodigd voor de simulaties bestaat uit twee delen:

- gegevens over de rookgassen van de topping cyclus (temperatuur, massastroom, samenstelling)
- gegevens over de condensor (koelwater intrede- en uittredetemperatuur)

De gegevens over rookgassamenstelling ontbreken vaak op de specsheets. De rookgassamenstelling wordt geschat op basis van de luchtfactor (λ) waarmee de motor functioneert. Daarvoor is door de Gasunie een tabel beschikbaar gesteld (tabel J7); de cursief gedrukte getallen zijn aangevuld door de TU Delft.

De mate van deellast wordt bepaald door de topping cyclus. Dus als de gasmotor op 50% van zijn nominale vermogen draait, wordt er gesproken over “50% deellast”. De bijbehorende rookgasgegevens worden uit de specsheets afgeleid, waarbij opgemerkt moet worden, dat de verandering rookgassamenstelling ten opzichte van de nominale last verwaarloosbaar is en dus constant wordt gehouden. Mocht tijdens de simulaties blijken, dat bepaalde procesparameters worden overschreden, dan wordt de massastroom rookgas gereduceerd. Daarbij wordt verondersteld, dat de overgebleven rookgassen naar de omgeving kunnen worden uitgevoerd. De hoeveelheid rookgassen dat werkelijk door de boiler van de ORC is gegaan, staat altijd duidelijk vermeld in het resultatenoverzicht.

Nadat alle invoer compleet is, kan aan het programma een commando worden gegeven om de berekening te starten. Er zullen dan enkele iteraties plaatsvinden om naar een eindresultaat te komen. Het is normaal, als er tijdens de simulatie waarschuwingen door het pakket worden afgegeven. Een dergelijke waarschuwing kan bijvoorbeeld door een variabele, dat een waarde heeft gekregen, dat buiten haar voorgeschreven domein ligt veroorzaakt worden. Voor zover deze waarschuwingen niet in de laatste iteratie hebben plaatsgevonden, hebben ze geen invloed op het resultaat van de simulatie.

De resultaten van de simulaties worden op de volgende punten geanalyseerd:

- de thermodynamische plausibiliteit
- de operationele aspecten
- de economische aspecten

Bij de thermodynamische plausibiliteit wordt er gekeken of de resultaten niet strijdig zijn met de wetten van de thermodynamica. Hoewel Cycle-Tempo met de routines is uitgerust, om de gebruiker op allerlei verschijnselen te attenderen, is het zeker zinvol om te bekijken of er geen ongebruikelijke uitkomsten zijn berekend. Als voorbeeld kan hier dienen het al eerder genoemde pompvermogen, dat met de Finse tolueeneigenschappen is berekend. CT geeft in dit geval geen waarschuwing, omdat een vermogen van nul op zich niet fout is. Verder dient met attent te zijn op verschijnselen als een onverwachte drukdaling in een pijp, onwaarschijnlijke temperaturen en massastromen. Naast de thermodynamica dient er ook aandacht besteed te worden aan de vraag of de uitgerekende bedrijfspunt in de werkelijkheid haalbaar zal zijn. Dit wordt verstaan onder de analyse van operationele aspecten. Het is mogelijk, dat er een bedrijfspunt wordt uitgerekend, waarbij een of meerdere parameters hun kritische waarden overschrijden. De voorbeelden zijn een druk, die de veiligheidsgrens overschrijdt of een generatorvermogen die meer is dan het nominale generatorvermogen.

In de praktijk geeft dat twee mogelijkheden:

- een bedrijfspunt kan door de installatie niet gerealiseerd worden; de installatie blijft draaien op een lager bedrijfspunt;
- een bedrijfspunt kan wel gerealiseerd worden, maar leidt tot de beschadiging van de installatie.

De resultaten zoals (netto) elektrisch vermogen en warmte overgedragen in de condensor behoren tot de economische aspecten van de simulatie. Deze zullen voor de economische berekeningen met Cogen Master Interactive worden gebruikt.

In tabel J8 staan enkele belangrijke procesparameters, die sterk afhankelijk zijn van de mate van deellast. De waarden, die in probleemgebied (zouden) liggen zijn cursief gedrukt.

Het blijkt dus, dat als alle rookgassen van een op vollast draaiende gasmotor door de boiler van de ORC zouden worden geleid, onder andere de turbine inlaatdruk en het generatorvermogen aanzienlijk boven hun nominale waarde zouden stijgen. Aangezien de installatie niet daarvoor ontworpen is, zou een dergelijk bedrijfspunt moeten worden vermeden. Bij nadere analyse blijkt echter, dat dit bedrijfspunt in de praktijk niet zal worden gehaald. Omdat de hoofdpomp en de turbine op een as zitten, zal bij elke toerental het bedrijfspunt door de turbine- en pompkarakteristiek bepaald worden. Omdat de pompkarakteristiek een aflopende lijn is, zal het nooit een druk hoger dan zijn maximale (hier: nominale) druk kunnen leveren. Daarom wordt dit (gesimuleerde) bedrijfspunt verworpen en de massastroom rookgas wordt zodanig aangepast, dat de turbine inlaatdruk de nominale druk niet overschrijdt. De resultaten staan in de kolom met toevoeging "rookbypass".

Cycle-Tempo is een pakket voor statisch modelleren, en heeft daarom geen routines voor de matching van turbine en pomp karakteristieken. Voor de gevallen zoals hiervoor beschreven, dient daarom handmatig te worden gecorrigeerd.

Nader bekeken wordt ook het model van de boiler. De boiler in de testopstelling is van de "doorpomp" type. Dat wil zeggen, dat het vloeibare tolueenstroom in een lange buis wordt opgewarmd, verdampt en oververhit. Er is geen aparte economiser, verdampers en oververhitter, er is ook geen drum. Een gevolg daarvan is, dat het traject waar de

verdamping plaatsvindt geen vaste ligging heeft, maar is afhankelijk van andere procesparameters (met name massastroom toluen en de temperatuur van de rookgasen). Dat levert een extra moeilijkheid op voor het modelleren, omdat het product van de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het warmtewisselend oppervlak ($U \cdot A$) niet constant is bij dit type boiler. In de ontwerpberekening berekent CT een $U \cdot A$ waarde voor elke warmtewisselaar, die dan in de deellastberekeningen constant wordt gehouden. Dit introduceert een zekere fout in de simulatieresultaten.

Het gedrag van het model van de boiler kan aan de hand van een overgedragen warmte – temperatuur diagram (Q-T diagram) worden bekeken. Een dergelijk diagram staat in figuur J5. “Heat Exchanger 6” is hier de boiler, “Heat Exchanger 5” de recuperator en “Flash Heater 9” is de condensor.

De rookgasenafkoellijn is nagenoeg recht. Daaronder ligt de toluenopwarmlijn. De vorm van deze lijn is geheel volgens de verwachting: eerst een opwarming van het vloeibare toluen naar zijn verdampingstemperatuur, dan een verdamping bij constante temperatuur en tenslotte oververhitting van de damp naar 325°C. Het gedrag van dit model van de doorpompetel is dus correct. Deze vorm van het Q-T diagram komt in alle simulaties van de cases zoals gedefinieerd in tabel J4 en tabel J5. De ligging en de breedte van het verdampingsgebied variëren echter, zoals hierboven uitgelegd.

In figuur J6 staat het turbinevermogen uitgezet tegen de warmteinput in de boiler. De bovenste lijnenverzameling hoort bij de condensorcondities 35/50 en de onderste bij 70/90. Op de kruising van de gestippelde lijnen ligt het ontwerp punt van de installatie. Voor de gesimuleerde cases zijn de bedrijfspunten in deze grafiek opgenomen. Verschillende kleuren geven verschillende cases aan. Geheel volgens de verwachting daalt het afgegeven generatorvermogen naarmate de voorgeschakelde gasmotor meer in deellast gaat opereren, d.w.z. als de hoeveelheid warmte overgedragen in de boiler daalt. Tevens daalt het afgegeven vermogen, als de temperatuur van het koelwater op een hoger niveau wordt ingesteld.

Figuur J7 toont het bruto elektrische rendement uitgezet tegen de warmte afgegeven in de boiler. Bruto elektrische rendement wil zeggen, dat het eigen elektriciteitsgebruik niet van het gegenereerde vermogen is afgetrokken. Ook hier heeft de bovenste lijn betrekking op de condensorconditie 35/50 en de onderste lijn op conditie 70/90.

Opvallend is, dat voor de condensorconditie 35/50 het bruto elektrische rendement van de ORC in de eerste instantie hoger wordt, als de gasmotor van de nominale last in deellastbedrijf gaat. Om dit te verklaren, zijn extra gegevens nodig. Deze staan in tabel J9. Gegevens in de kolommen A, B en C zijn afgeleid aan de respectievelijk 100%, 75% en 50% van de nominale last van de gasmotor. Het bruto elektrische rendement wordt bepaald door het gegenereerd elektrisch vermogen te delen door de hoeveelheid warmte overgedragen in de boiler. Gegenereerd elektrisch vermogen is een verschil van het vermogen geleverd door de turbine en het vermogen benodigd door de hoofdpomp voor het verpompen van toluen. Nu blijkt, dat er in deellastbedrijf het pompvermogen aanzienlijk sneller daalt, dan andere variabelen die het rendement bepalen. Dus hoewel bij toenemende deellast het door de turbine afgegeven vermogen sneller daalt dan de hoeveelheid in de boiler overgedragen warmte, zorgt het sterker dalende pompvermogen ervoor, dat er toch een rendementsstijging wordt berekend.

5.4 Validatie

De hiervoor gepresenteerde resultaten van diverse simulaties zijn verkregen uit een met betrekking tot de thermodynamica aannemelijk en consequent model. Door een

gebrek aan meetgegevens is de validatie van het model tot op het moment van de totstandkoming van dit verslag beperkt gebleven.

Tabel J10 toont een overzicht van de verschillende waarden gemeten tijdens een test en tevens de waarden die van de metingen zijn afgeleid. Daarnaast staan er in de tabel de bijbehorende simulatieresultaten en procentuele verschillen tussen gemeten en berekend. Sommige meetwaarden zijn gebruikt als invoer voor het model, waardoor het verschil tussen gemeten en berekend nihil is. Dit is in de laatste kolom aangeduid met "invoer".

Over de inhoud van tabel J10 kunnen volgende opmerkingen worden gemaakt:

- de waarden berekend met het model zijn over het algemeen hoger dan gemeten waarden;
- een laag gemeten temperatuur bij de secundaire inlaat van de recuperator wordt veroorzaakt door een lekstroom van koud tolueen voor het smeren van de lagers. Zonder deze lek zou de bedoelde temperatuur op ongeveer 225 °C liggen;
- de bovengenoemde lekstroom is ook in de eerste instantie de oorzaak van relatief gezien het grootste verschil tussen gemeten en berekende grootheid – het vermogen van de recuperator;
- het grote verschil in de resultaten voor de turbine is mede veroorzaakt door een gecombineerd effect van het verschil in tolueenhoofdstroom en de turbine inlaatdruk;
- de druk in de condensor ligt boven de verzadigingsdruk van puur tolueen. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van niet-condenseerbare gassen in de condensor;

De eerste vergelijking van het model met de werkelijkheid geeft een positieve indruk. De verschillen zoals weergegeven in tabel zijn zeer acceptabel te noemen, temeer omdat ze goed verklaarbaar zijn. Verder is het model nooit eerder geoptimaliseerd aan de hand van meetgegevens, waardoor enige mate van discrepantie haast niet uit te sluiten is.

Het mag duidelijk zijn, dat om tot een nauwkeurig model van de installatie te komen meer testgegevens en modeloptimalisatie nodig is. De bovenstaande toont echter aan, dat voor economische en trendanalyses met dit model nuttige resultaten kunnen worden verkregen.

6. Economische uitgangspunten voor de rentabiliteit

6.1 Energie inkoop en verkoop

Voor de gasprijs is uitgegaan van de 'forward' gasprijs voor grootverbruikers voor 2005. Deze prijs is momenteel (juni 2004) 12,5 €/m³. De transportkosten voor gas worden berekend volgens het CDS systeem dat gold bij aanvang van 2004. In dit systeem zijn transportkosten voor gas met name afhankelijk van het totaal afgenomen volume gas, de bedrijfstijd en de maximale piek. In de gevoeligheidsanalyse wordt de gasprijs gevarieerd.

De energiebelasting voor gas is opgebouwd volgens de onderstaande tabel. Er wordt onderscheid gemaakt tussen energiebelasting voor 'normale' gebruikers (zoals ziekenhuizen en universiteiten) en tuinbouwafnemers. De laatste groep betaalt minder energiebelasting, zoals ook uit de tabel blijkt.

Energiebelasting Gas		EB normaal	EB tuinbouw
Ondergrens (m ³)	Bovengrens (m ³)	in €/m ³	in €/m ³
0	- 5.000	14,290	1,295
5.001	- 170.000	7,270	1,207
170.001	- 1.000.000	2,270	1,144
1.000.001	- 10.000.000	1,130	1,130
10.000.001	-	0,750	0,750

Tabel 8. Energiebelasting voor gas (EB gas) stand 2004

Voor de inkoopprijs van elektriciteit is uitgegaan van de geldende prijzen voor grootverbruikers tijdens het eerste kwartaal van 2004. Deze zijn 5,2 €/kWh voor afname tijdens plateau-uren en 2,5 €/kWh voor afname tijdens daluren. In de gevoeligheidsanalyse wordt eerst gekeken naar een hogere prijs voor elektriciteit tijdens de plateau-uren. Tevens wordt een algemeen hoger prijspeil (voor zowel plateau – als daluren) bekeken.

De transportkosten voor elektriciteit zijn berekend met het gemiddelde van de tarieven van de 4 grootste netbeheerders (te weten: Continuon, Essent Noord, Essent Zuid en Eneco Netbeheer). Er is gekozen voor een aansluiting op middenspanning. In de berekeningen is er vanuit gegaan dat het inkoopcontract niet wordt aangepast ten opzichte van gescheiden inkoop van elektriciteit en gas.

De energiebelasting voor elektriciteit is opgebouwd volgens de onderstaande tabel.

Energiebelasting Elektriciteit			€/kWh
Ondergrens (kWh)	Bovengrens (kWh)		
0	- 10.000		6,54
10.001	- 50.000		2,12
50.001	- 10.000.000		0,65
10.000.001	-		0,05

Tabel 9. Energiebelasting elektriciteit (EB elektriciteit) stand 2004

De opbrengst van elektriciteit bij verkoop aan het net is aangenomen op 80% van de inkoopprijs bedraagt. Dit betekent een opbrengst bij plateau - en daluren van respectievelijk 4,16 €/kWh en 2 €/kWh. Als gevoeligheid wordt bepaald wat de invloed is als de verkoopprijs gelijk wordt aan de inkoopprijs van elektriciteit (exclusief transportkosten en energiebelasting).

6.2 Investering en onderhoudskosten

De investeringen voor de ORC, de motor voor de nieuwbouwsituatie en de gasturbine zijn gegeven in de onderstaande tabel.

Het investeringsbedrag voor de ORC is geschat op basis van een prognose bij voldoende productieaantallen en bedraagt 1500 €/kWe (bij een effectief vermogen van 162 kWe). De onderhoudskosten voor de ORC zijn gebaseerd op de onderhoudskosten van een kleine gasturbine, vanwege een gelijksoortige technologie. Tevens wordt de invloed bepaald van hogere en lagere investeringskosten per kWe.

De investering in de nieuwe gasmotor is op basis van een indicatie van de leverancier van de gekozen motor. Voor de investeringssom is rekening gehouden met eventuele aanpassingen in het systeem door de naschakeling van de ORC. De extra kosten hiervoor zijn aangenomen als 5% van de totale investering in de motor. Het investeringsbedrag is inclusief alle directe randapparatuur met daarbij omkasting, het besturingspaneel en engineering. De kosten voor de grote revisie na 10 jaar zijn niet meegenomen.

De investering in de gasturbine is een eigen raming op basis van eerdere studies en gegevens uit de markt (Gasturbineworld Handbook). Het betreft hier 'skidmounted' gasturbine met een generator, in- en uitlaat. De kosten voor engineering en een afgassenketel dienen hier nog bij opgeteld te worden. Voor de afgassenketel is €150.000 gerekend. Voor engineering is 15% van de waarde van de gasturbine gerekend. De onderhoudskosten zijn gebaseerd op een onderhoudsprijs van 0,5 €/kWh en omgerekend naar onderhoudskosten per draaiuur.

Installatie	Vermogen (kWe)	Investerings totaal (€)	Onderhoudskosten (€/draaiuur)
ORC Tri-O-Gen (1500 €/kWe)	162	243.000	0,85
Gasmotor Deutz TBG 620 V16 K	1464	495.000	8,50
Gasturbine+ketel P&W ST6L -813	848	805.000	4,10

Tabel 10. Investering en onderhoudskosten

De kosten een investering in een netaansluiting zijn onduidelijk en erg locatiegebonden. Vaak is er ook al een netaansluiting aanwezig. Om deze twee redenen zijn de kosten voor netaansluiting buiten beschouwing gelaten. De investering in een rookgasreiniger bij de tuinbouw is niet beschouwd in deze analyse omdat deze bij zowel de WK als de combinatie van de ORC met WK geplaatst wordt.

In deze studie is aangenomen dat de afschrijving van de investering en de looptijd van het project aan elkaar gelijk zijn. Er is gekeken naar een looptijd van 10 jaar en 15 jaar. De verdisconteringsvoet bedraagt 15%.

6.3 Subsidies

Voor ondersteuning van de investering is voor dit project alleen gekeken naar de EIA regeling (Energie Investering Aftrek). Andere mogelijke regelingen lopen via tenders die pas ten tijde van een reëel project in dat betreffende jaar kunnen worden aange-

vraagd en waarvan niet zeker is of de aanvraag gehonoreerd wordt. Het voordeel van de EIA op investering bedraagt 18%.

Non-profit instellingen zoals ziekenhuizen en universiteiten komen niet in aanmerking voor de EIA - regeling. Dit heeft echter een sterk effect op het resultaat. De invloed hiervan voor deze sectoren wordt als gevoeligheid in de resultaten meegenomen

De MEP subsidie ondersteunt de productie van CO₂- vrije kWh's uit een WK installatie met 2,6 €ct/kWh (Bron: Cogen Nederland). Het percentage CO₂- vrije kWh's (de CO₂ - index) wordt vastgesteld op basis van het thermisch - en elektrisch rendement van de WK en het jaar van aanschaf. De CO₂ index per gasmotor is gepubliceerd in de staatscourant.

Het is nog niet duidelijk wat de invloed van de ORC is op de CO₂ index van de WK installatie. Daarom is er voor gekozen de CO₂ index gelijk te houden als de ORC wordt nageschakeld aan een WK installatie. De combinatie van ORC en WK wordt dan beschouwd als één installatie. In de gevoeligheidsanalyse wordt deze aanname nader beschouwd door de MEP - subsidie te verhogen of te verlagen.

7. Berekeningsmethodiek en gevoeligheden

Met behulp van het simulatieprogramma Cogen Master *interactive* wordt nu ten opzichte van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte voor WK en de WK in combinatie met de ORC bepaald voor de verschillende sectoren.

7.1 Berekeningsmethodiek Cogen Master *interactive*

De eerder opgegeven energie verbruiken van de verschillende sectoren zijn in Cogen Master *interactive* (CMi) ingevoerd om de WK en de combinatie van WK/ORC te simuleren.

De benodigde stappen voor de simulatie in CMi zijn

1. Opgeven energieverbruik (elektriciteit en gas) en opstellen van een jaarbelastingduurkrommes voor elektriciteit en gas
2. Opgeven van de gewenste WK of combinatie van WK met ORC en berekening van de energie verbruiken van de WK(/ORC)
3. Vergelijking van de energiehuishouding ten opzichte van de conventionele situatie van gescheiden inkoop
4. Opgeven van economie en energieprijzen (elektriciteit en gas)
5. Berekening van het verschil tussen WK(/ORC) en gescheiden inkoop

Deze stappen worden hieronder kort toegelicht

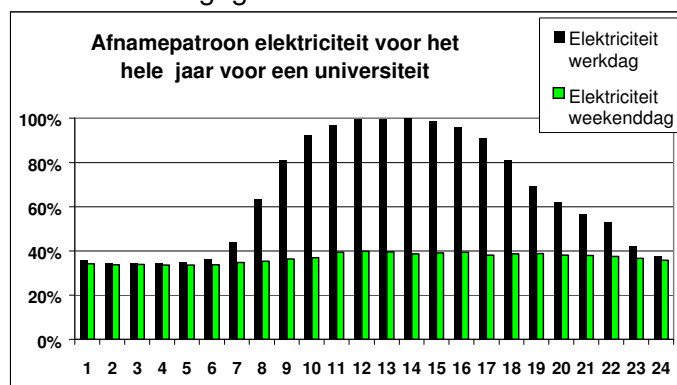
Energieverbruik en jaarbelastingduurkrommes

Het opgegeven maandverbruik van gas en elektriciteit wordt door CMi omgerekend naar energieafnamen per uur voor de opgegeven maand aan de hand van een representatief 'afnamepatroon' voor zowel elektriciteit als warmte. Bij de omrekening naar uurwaarden in de betreffende maand wordt in CMi rekening gehouden met het aantal werkdagen, zaterdagen en zondagen van die maand. Voor elke maand worden zo de uurwaarden bepaald.

Het representatieve afnamepatroon is de weergave van de elektriciteit - of warmteafname per uur voor een representatieve dag in de betreffende maand. Het is in principe mogelijk om voor elke maand een ander representatief afnamepatroon op te geven. In theorie zijn er zo 12 verschillende patronen in een jaar mogelijk voor zowel warmte als elektriciteit (voor elke maand één). Voor elke sector gelden andere afnamepatronen.

Met de aldus bepaalde uurwaarden wordt dan de 'jaarbelastingduurkromme' (8760 uur) opgesteld voor elektriciteit en warmte van de beschouwde case.

De werkwijze voor het opstellen van de afnamepatronen wordt hier niet verder toegelicht maar is opgenomen in bijlage B. Daarin zijn ook de afnamepatronen van de verschillende sector gegeven. Als voorbeeld is hieronder een van een universiteit het afnamepatroon voor voor elektriciteit gegeven.



Figuur 9. Voorbeeld van een afnamepatroon voor elektriciteit

Opgeven gasmotoren en berekening energieverbruik

Door de TU Delft is met CycleTempo bepaald wat het deellast en vollastgedrag is van de combinatie van de WK met een ORC. Deze gegevens worden door CMi gebruikt voor de berekening van de inzet van de WK(/ORC). Hierbij wordt het energieverbruik van de WK of de WK/ORC vergeleken met de situatie van gescheiden inkoop van elektriciteit en gas. In deze studie zijn steeds 3 situaties doorgerekend:

1. De bestaande WK('s), met het vastgestelde aanstuurregime en temperatuur van de warmtelevering. Hiermee wordt een simulatie uitgevoerd met de huidige WK
2. Een combinatie van een ORC met een of meerdere WK's waarbij de condensor van de ORC op LAGE temperatuur warmte levert. Als de warmtegebruiker een HT warmtebehoefte heeft kan, dan warmte uit de LT condensor van de ORC niet ingezet worden. De combinatie van een WK met een ORC en een LT condensor levert wel de grootste hoeveelheid extra elektriciteit uit de ORC (maar kan dus leiden tot warmtevernietiging).
3. Een combinatie van een ORC met een of meerdere WK's waarbij de condensor van de ORC op HOGE temperatuur warmte levert. In deze optie kan de HT warmte uit de condensor van de ORC altijd ingezet worden bij de gebruiker. Nadeel van deze optie is dat er minder extra elektriciteit door de ORC geproduceerd wordt.

Deze situaties worden doorgerekend voor elke sector volgens de vastgestelde uitgangspunten. Voor de sectoren met een HT-net levert dit de onderstaande tabel met de mogelijke combinaties op:

Hoge temperatuur warmtenet Condensortemperatuur ORC		50 ^o	90 ^o
Sector	Tuinbouw (GM)	(x)	(x)
	Ziekenhuizen (GM)	X	X
	Universiteiten (GM)	X	X
	Industrie (GT)	X	X

Warmtevernietiging! \longrightarrow \uparrow

Tabel 11. mogelijke combinaties van WK met een HT - warmtenet

- X** = in deze studie beschouwde toepassing van de ORC
(x) = Mogelijke toepassing van de ORC, in deze studie niet beschouwd
 = niet van toepassing

Toelichting op de afkortingen: HT = 90^o ingaande temperatuur, 70^o retour, LT = 50^o ingaande temperatuur, 30^o retour

De combinatie van een hoge temperatuur warmtenet met een LT uitvoering van de ORC betekent dat de warmte uit de condensor van de ORC vernietigd moet worden. Dit heeft een aanzienlijke daling van het thermisch rendement tot gevolg. De glastuinbouw heeft wel een HT net, maar wordt in deze studie niet nader beschouwd omdat we in deze studie uitgaan van een glastuinbouwbedrijf met een LT net. Voor de sectoren met een LT net (glastuinbouw) is hieronder de tabel gegeven.

Lage temperatuur warmtenet

Condensortemperatuur ORC		50 ^o	90 ^o
Sector	Tuinbouw (GM)	X	X
	Ziekenhuizen (GM)	-	-
	Universiteiten (GM)	-	-
	Industrie (GT)	-	-

Tabel 12. mogelijke combinaties van WK met een LT warmtenet

- X** = in deze studie beschouwde toepassing van de ORC
(x) = Mogelijke toepassing van de ORC, in deze studie niet beschouwd
 - = niet van toepassing

Toelichting op de afkortingen: HT = 90^o ingaande temperatuur, 70^o retour, LT = 50^o ingaande temperatuur, 30^o retour

Voor elke sector wordt eveneens een case doorgerekend met een nieuwe te plaatsen WK mét en zonder een ORC. Hierbij wordt op dezelfde wijze te werk gegaan als voor de bestaande situaties. De nieuwe gasmotor is voor alle sectoren een Deutz TBG 620 V16 K. Voor de gasturbine case is (uiteraard) gebruik gemaakt van de gekozen gasturbine.

In de tabel hieronder staan de gegevens van de gasmotoren/gasturbine mét en zonder een nageschakelde ORC installatie. Deze worden in CMI gebruikt worden voor de berekening. In de tabel zijn aangegeven:

- De sector die van toepassing is
- De inpassing in het warmtenet dat nu gebruikt wordt in de sector
- Het elektrisch - en thermisch vermogen én het gasverbruik bij 100%, 75% en 50% motorlast voor de gasmotor en de combinatie van de gasmotor met de ORC
- De gasmotor voor de nieuwbouwsituatie en de eigenschappen daarvan
- De gasturbine voor de industriecase met alleen het vollastgedrag

		Electric power			Thermal power			Gas consumption		
		kWe			kWth			m ³ /hour		
		100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%
Ziekenhuis	HT inpassing									
GeCat 3512		1.370	1.010	688	1.704	1.368	1.064	422	330	238
GeCat3512+ORC	LT ORC condensor	1.533	1.160	795	974	717	584	422	330	238
GeCat3512+ORC	HT ORC condensor	1.493	1.128	771	1.600	1.287	1.001	422	330	238
Universiteiten	HT inpassing									
MAN 20/13		1.414	1.060	706	2.324	1.606	1.274	472	346	258
MAN 20/13+ORC	LT ORC condensor	1.577	1.201	808	2.202	1.497	1.195	472	346	258
MAN 20/13+ORC	HT ORC condensor	1.536	1.170	785	2.250	1.535	1.225	472	346	258
Tuinbouw	LT inpassing									
GeCat 3512		1.476	1.108	736	2.226	1.762	1.304	440	344	248
GeCat3512+ORC	LT ORC condensor	1.639	1.261	845	2.071	1.618	1.208	440	344	248
GeCat3512+ORC	HT ORC condensor	1.599	1.228	821	1.596	1.288	1.001	440	344	248
Industrie	HT inpassing									
PW ST6L		1.696	-	-	1.993	-	-	370	-	-
PW ST6L+2*ORC	LT ORC condensor	2.022	-	-	27	-	-	370	-	-
PW ST6L+2*ORC	HT ORC condensor	1.941	-	-	1.159	-	-	370	-	-
Nieuwbouw										
Deutz 620	LT inpassing	1.453	1.090	726	2.000	1.571	1.124	409	316	226
Deutz 620	HT inpassing	1.453	1.090	726	1.700	1.347	972	409	316	226
Deutz 620+ORC	LT ORC condensor	1.616	1.248	838	1.839	1.416	1.020	409	316	226
Deutz 620+ORC	HT ORC condensor	1.576	1.213	813	1.590	1.236	899	409	316	226

Tabel 13. Gebruikte motor- en gasturbinegegevens in CMI

Economische berekening

De uitkomsten van de berekende energiehuishouding worden gebruikt in de economiemodule van CMI. Hier wordt met de momenteel geldende tariefstructuren voor elektriciteit en gas de inkoop - en verkoopkosten van energie berekend. De berekening van economie van de WK en WK/ORC verloopt als volgt:

Alle situaties (combinatie van gasmotor/gasturbine met ORC) worden vergeleken met de situatie waarbij in de energiebehoefte wordt voorzien door inkoop van elektriciteit uit het net en opwekking van warmte in een ketel. Dat levert voor elke situatie het voordeel op ten opzichte van gescheiden opwekking.

Voor elke situatie wordt het exploitatieresultaat per jaar berekend *exclusief* kapitaallasten. Deze worden uiteraard wel meegenomen bij de bepaling van de interne rentevoet en netto contante waarde van de beoordeelde situatie. Het exploitatieresultaat wordt voor elke situatie opgesteld aan de hand van de onderstaande posten.

<u>Gasinkoop</u>	Gasinkoop ten behoeve van de ketel en WK Netwerk en distributiekosten Energiebelasting gas
<u>Elektriciteitsinkoop</u>	Inkoopkosten Elektriciteit Netwerkkosten Energiebelasting elektriciteit
<u>Elektriciteitsverkoop</u>	Verkoopopbrengsten elektriciteit Ondersteuning door MEP-regeling
<u>Beheer & Onderhoud</u>	Onderhoudskosten van de WK Onderhoudskosten van de ORC

7.2 Berekening rentabiliteit

Met de baten en lasten berekening in CMI is de jaarlijkse opbrengst van de cases bepaald. Hieruit volgt het voordeel van elke case ten opzichte van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte.

Daarmee is het onderlinge verschil bepaald tussen het voordeel van de WK-sec en het voordeel van de WK/ORC. Dit levert dan het voordeel van de ORC ten opzichte van een reeds bestaande of nieuw te plaatsen WK installatie.

Hiermee wordt de rentabiliteit van de cases berekend en als volgt gepresenteerd:

- Het voordeel van de ORC ten opzichte van het voordeel dat reeds bestaat voor de bestaande WK installatie (gasmotor of gasturbine).
- De Simple Pay Out Time (SPOT). Dit is de investeringssom voor de ORC (uitgaande van 1500 €/kWe) gedeeld door het extra voordeel van de ORC per jaar. Er is hier nog niet gekeken naar belastingen. Voor de ziekenhuizen en universiteiten is gekeken naar de SPOT zonder aftrek van EIA.

Voor de berekening van de rentabiliteit van de drie varianten bij de gasturbinecasus (zie pagina 16) is alleen voor variant 1 een simulatie uitgevoerd met CMI. De uitkomsten van deze variant dienen als uitgangspunt voor de rentabiliteitsberekening van de varianten 2 en 3. Hiervoor is als volgt te werk gegaan:

- Bij variant 2 wordt er geen extra gas inkoop bij de GT/ORC combinatie ten opzichte van de gasinkoop voor alleen de GT. Dit levert een extra voordeel op voor de ORC in de vorm van géén extra gasinkoop
- Bij variant drie wordt 50% van de extra gasinkoop van variant 1 meegerekend voor de berekening van de rentabiliteit. Het voordeel voor de ORC is hier dus minder groot dan voor variant 2.

7.3 Geanalyseerde gevoeligheden

De gevoeligheden kunnen beschouwd worden als kritische succesfactoren voor de ORC. De resultaten worden met elkaar vergeleken aan de hand van het voordeel van de ORC ten opzichte van de bestaande of nieuwe WK installatie en aan de hand van de SPOT.

De gevoeligheden zijn bepaald voor cases in de tuinbouw, ziekenhuizen en universiteiten. Voor de gasturbine case is alleen een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd in de vorm van de 3 beschreven varianten. De gevoeligheid voor de uitgangspunten bleek zo groot dat een uitgebreide gevoeligheidsanalyse voor de gasturbinecase niet zinvol was.

Voor deze studie zijn de nu volgende gevoeligheden onderzocht en in de bijlagen C t/m F opgenomen.

Looptijd van het project

De gevoeligheid van de looptijd van het project is bepaald voor de 'basecase'. De looptijd van het project is gelijk genomen aan de afschrijftermijn. De resultaten zijn bepaald voor een looptijd van 10 jaar en 15 jaar. In tegenstelling tot de rest van de bepaalde gevoeligheden worden hier gekeken naar de terugverdientijd (TvT) en de interne rentevoet (IRR). De terugverdientijd wordt berekend NA belastingen. In tegenstelling tot de SPOT, die voor de andere gevoeligheden gebruikt wordt, is hier rekening gehouden met een vennootschapsbelasting van 35%.

Hoogte investering

De investeringsraming voor de ORC is nog onduidelijk. In de presentatie van de uitkomsten is uitgegaan van 1500 €/kWe. Dit is de verwachte kostprijs van de ORC wanneer er voldoende aantallen geproduceerd kunnen worden. De prijs voor de eerste units zal hoger liggen dan deze aangenomen prijs. Tevens zijn de resultaten bepaald voor investeringen in de range van 2500 €/kWe, 2000 €/kWe en 1000 €/kWe.

De condensoruitvoering van de ORC

De temperatuur van de warmtelevering is van belang voor de ORC. Er zijn –globaal – twee temperaturen waarop warmte wordt geleverd, te weten: op lage temperatuur (LT) bij ca. 50°C en op hoge temperatuur (HT) bij ca. 90°C. In ziekenhuizen en universiteiten is alleen een HT warmte net aanwezig. In de tuinbouw komen ook LT – netten voor. Met name voor nieuwbouwprojecten is dit in de tuinbouw standaard.

Bij het opgeven van de motorkarakteristieken in CMi is rekening gehouden met het temperatuurniveau waarop de gebruiker de warmte nodig heeft. Zo is de warmte uit de condensor van een ORC met LT condensor niet inzetbaar in een HT net. Deze warmte wordt dan ook niet meegerekend als nuttige warmteoutput voor de simulatie. Voor alle cases is de gevoeligheid voor een LT – of HT uitvoering van de ORC bepaald.

Energiebehoefte basecase

De energiebehoefte is bepalend voor het aantal draaiuren van de WK en daarmee voor de draaiuren van de ORC. Voor de bepaling van de gevoeligheid voor de energiebehoefte is bij gelijkblijvende gasmotor de energievraag vergroot of verkleind. De belangrijkste effecten die optreden bij het veranderen van de energievraag zijn veranderingen in:

- draaiuren van de gasmotor
- gas – en elektriciteitsinkoop
- onderhoudskosten

Bij het aanpassen van de energievraag verandert doorgaans ook het jaarresultaat van de reeds bestaande gasmotor/turbine. Dit kan dan ook invloed hebben op het voordeel van de ORC bij het naschakelen van een ORC installatie.

Voor de tuinbouwcase is gekeken naar tuinbouwbedrijf van 2ha, 3ha en 4 ha (respectievelijk 100%, 150%, 200%) met allemaal dezelfde motor.

Voor de ziekenhuizen is gekeken naar een variatie van 75%, 100% en 125% van de opgegeven behoefte.

Elektrisch vermogen ORC

Voor het geval dat de prestaties van de ORC afwijken is de gevoeligheid van de uitkomsten bepaald voor een hoger elektrisch vermogen en een lager elektrisch vermogen van de ORC. Het opgegeven vermogen (162 kWe aan de klemmen) is gevarieerd met +/- 20 kWe.

Gasprijs

De hoogte van de gasprijs is van belang om de kosten te bepalen van extra gasinkoop als gevolg van een lager thermisch rendement van de combinatie van de ORC met een WK. Voor de gasprijs wordt uitgegaan van de basisgasprijs van 12,5 €/m³, en er wordt gevarieerd naar een prijs van 10 €/m³ en een prijs van 15,6 €/m³

Elektriciteitsprijs

De elektriciteitsprijs is aangenomen op 5,2 en 2,5 €/kWh. In de simulatie is de gevoeligheid bepaald voor een hogere prijs tijdens plateau-uren (6,25 €/kWh) bij gelijkblijvende daluren prijs. Dit geeft tevens een maat voor de gevoeligheid van het verschil tussen plateau en daluren. Tevens is gekeken naar een situatie waarbij zowel de prijzen in zowel plateau – als daluren hoger zijn, te weten 6,25 en 3 €/kWh. De verkoopprijs van elektriciteit die aan het net geleverd wordt, is in deze studie aangenomen op 80% van de inkoopprijs. De verkoopprijs stijgt dus mee met het hogere prijsniveau.

Verkoopprijs elektriciteit

De verkoopprijs van een kWh wordt door de markt bepaald. In de studie is uitgegaan van 80% van de inkoopprijs voor elektriciteit. Tevens is gekeken naar een verkoopprijs die gelijk is aan de inkoopprijs van elektriciteit.

Hoogte van de MEP subsidie

De MEP subsidie voor WK is momenteel vastgesteld op 2,60 €/ct per CO₂ vrije kWh die aan het net geleverd wordt. Bij meer dan 10 mln kWh inkoop uit het net komt ook elektriciteit voor eigen gebruik uit de WK in aanmerking voor de MEP subsidie. Het MEP bedrag wordt jaarlijks opnieuw vastgesteld door de overheid. In deze studie wordt een vergelijking gemaakt tussen een sterke stijging of daling van het MEP bedrag naar respectievelijk 3,9 en 1,3 €/ct per CO₂ vrije kWh.

CO₂ index

Het is nog niet duidelijk wat de invloed van de ORC is op de CO₂ index van de WK installatie. Daarom is er voor gekozen de CO₂ index van de bestaande WK installatie gelijk te houden als de ORC wordt nageschakeld. De combinatie van ORC en WK wordt dan beschouwd als één installatie. In de gevoeligheidsanalyse wordt deze aanname nader beschouwd door de CO₂ index te verhogen met 10%.

Gebruik van een rookgasreiniger

Het gebruik van een rookgasreiniger in combinatie met WK is specifiek voor de glastuinbouw. Het gebruik van een rookgasreiniger bij een WK mét een netaansluiting verhoogt het aantal draaiuren van de WK-installatie met circa 1600 uur.

Ook de ORC profiteert van deze extra draaiuren. Als extra gevoeligheid in deze studie is voor de tuinbouw wordt gekeken naar een tuinbouwbedrijf mét en zonder rookgasreiniging.

Deze gevoeligheid is ook een goede indicatie voor de invloed van bedrijfstijd op de rentabiliteit van de ORC.

8. Resultaten rentabiliteitsberekening

De resultaten van de simulaties met Cogen Master interactive ten behoeve van de rentabiliteitsberekening volgen in dit hoofdstuk. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse per sector zijn opgenomen in de bijlagen.

8.1 Samenvatting resultaten

De resultaten van de rentabiliteitsberekening voor de base cases met zijn hieronder gegeven. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen een retrofitsituatie en een nieuwbouwsituatie

Bij retrofit wordt de ORC nageschakeld aan een bestaande WK, waarbij het elektrisch vermogen dus toeneemt, ten koste van een afname van het thermisch vermogen van de WK installatie. Dit alles bij gelijkblijvende gasinput. Voor de nieuwbouwsituatie wordt de WK/ORC combinatie vergeleken met een andere WK die hetzelfde elektrisch vermogen heeft als de WK/ORC combinatie.

Retrofit

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten van de rentabiliteitsberekening voor alle sectoren. In de tabel is weergegeven:

- Het voordeel van de ORC. Dit is bepaald ten opzichte van het voordeel dat reeds bestaat voor de bestaande WK installatie.
- De Simple Pay Out Time (SPOT). Dit is de investeringssom voor de ORC (1500 €/kWe) gedeeld door het extra voordeel van de ORC per jaar. Er is hier nog niet gekeken naar belastingen. Voor de ziekenhuizen en universiteiten is gekeken naar de SPOT zonder aftrek van EIA.

Op basis van de SPOT kan geconcludeerd worden dat de meest gunstige toepassing voor de ORC in de tuinbouw ligt. De redenen hiervoor zijn dat de tuinbouwcase een hoge bedrijfstijd heeft voor de gekozen teelt (roos) en het gebruik van rookgasreiniging. Tevens is er in deze sector sprake van een zeer vlakke afname: voor de belichting wordt altijd het maximale piekvermogen gevraagd.

Retrofit situatie				
Sector	Voordeel LT ORC (€)	SPOT LT ORC (jaar)	Voordeel HT ORC (€)	SPOT HT ORC (jaar)
Tuinbouw 2ha	33.802	5,9	25.191	7,9
Tuinbouw 3ha	46.410	4,3	23.404	8,1
Ziekenhuizen	4.453	54,6	25.224	9,6
Universiteiten	45.660	5,3	34.349	7,1
Gasturbine variant 1 ⁵ (100% warmtebenutting)	-117.693	-	65.572	6,1
Gasturbine variant 2 ⁵ (geen warmtebenutting)	164.853	2,4	122.402	3,3
Gasturbine variant 3 ⁵ (50% warmtebenutting) ⁹	23.580	16,9	93.807	4,2

Tabel 14. Overzicht voordeel ORC ten opzichte van het voordeel van een WK bij een retrofitsituatie

⁹ Voor een beschrijving van de varianten zie pagina 16

Uit de resultaten blijkt dat de tuinbouw de meest interessantste sector voor de ORC lijkt. De redenen hiervoor zijn de volgende:

- Een hoge bedrijfstijd, als gevolg van veel belichtingsuren en het gebruik van rookgasreiniging
- Veel vollast - draaiuren doordat alle elektriciteit wordt geproduceerd of ingekocht ten behoeve van de belichting
- Het belang van elektriciteit als kostenpost in de energiehuishouding door een hoge kracht/warmteverhouding

Nieuwbouw

Hieronder zijn de resultaten gegeven voor de rentabiliteit in een nieuwbouwsituatie van voor de combinatie van WK/ORC. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat het elektrisch vermogen van de WK/ORC bij benadering even groot als het elektrisch vermogen van een nieuw te plaatsen gasmotor.

Het lijkt in alle gevallen economisch gunstiger te zijn om een nieuwe WK aan te schaffen met een groter vermogen, dan om een WK te combineren met een ORC. Hierbij is geen rekening gehouden met externe drijfveren (bijvoorbeeld een verbod op warmtevernietiging)

Het feit dat een grotere WK aantrekkelijker is dan een iets kleinere WK in combinatie met een ORC is terug te voeren op de prijs per geïnstalleerde kW-elektrisch. Deze prijs is bij de gehanteerde vermogens veel lager voor een WK met een groter vermogen dan voor een ORC.

Tuinbouw 2 ha – Nieuwbouw			
	Voordeel (€)	Totaal investering na EIA (€)	SPOT (jaar)
WK (1615 kWe)	185.703	396.000	2,1
WK/LT ORC	224.162	531.360	2,3
WK/HT ORC	215.297	531.360	2,5
Tuinbouw 3 ha – Nieuwbouw			
	Voordeel (€)	Totaal investering na EIA (€)	SPOT (jaar)
WK (1626 kWe)	256.385	396.000	1,5
LT ORC	296.358	531.360	1,8
HT ORC	273.335	531.360	1,9

Universiteit – Nieuwbouw			
	Voordeel (€)	Totaal investering geen EIA (€)	SPOT (jaar)
WK (1615 kWe)	433.406	550.000	1,3
WK/LT ORC	448.868	738.000	1,6
WK/HT ORC	400.708	738.000	1,8

Ziekenhuizen – Nieuwbouw			
	Voordeel (€)	Totaal investering geen EIA (€)	SPOT (jaar)
WK (1615 kWe)	262.496	550.000	2,1
WK/LT ORC	296.902	738.000	2,5
WK/HT ORC	287.400	738.000	2,6

Gasturbine – Nieuwbouw			
	Voordeel (€)	Totaal investering na EIA (€)	SPOT (jaar)
GT (848 kWe)	333.202	579.600	1,7
LT ORC	215.509	929.520	4,3
HT ORC	398.774	929.520	2,3

Tabel 15. Overzicht voordeel ORC ten opzichte van het voordeel van een WK bij een nieuwbouwsituatie

8.2 Succesfactoren voor de ORC

Op basis van de gegeven overzichten en de gevoeligheidsanalyses (in de bijlagen) zijn een aantal 'succesfactoren' voor de ORC vastgesteld. Deze factoren geven in een retrofit-situatie voor de ORC de kortste terugverdientijden. De terugverdientijden liggen tussen 2,4 jaar (gasturbine zonder warmtebenutting) en 6,1 jaar (gasturbine met volledige warmtebenutting):

1. Een huidige WK met een laag elektrisch rendement. Bijvoorbeeld de case van de universiteit is hiervan een goed voorbeeld. De gebruikte WK heeft een laag rendement, waardoor de ruimte voor verbetering met bijvoorbeeld een ORC groot is. Dan moet wel de warmte uit de ORC ingezet kunnen worden.
2. Een huidige situatie waarbij de WK niet optimaal gedimensioneerd is. De case van de TU Delft is hier een goed voorbeeld. Hoewel de WK op zichzelf al voordeel oplevert, kan een ORC bijdragen aan extra voordeel ten opzichte van gescheiden inkoop. Dit in tegenstelling tot de case van de ziekenhuizen, waarbij de huidige WK al optimaal gedimensioneerd lijkt.
3. Een energiehuishouding waarbij het gebruik van elektriciteit ten opzichte van warmte zeer hoog is, zie hiervoor de tuinbouw. In deze gevallen is vermeden inkoop van elektriciteit veel waard.
4. Een situatie waarbij sprake is van warmtevernietiging. Dit komt doorgaans doordat de WK te groot is. Of omdat de WK alleen ingezet wordt voor elektriciteitslevering, hoewel dit maar zeer zelden voor zal komen. In deze gevallen is de naschakeling van een ORC zeer gunstig.

De complete resultaten van de simulaties van de verschillende basecases is opgenomen in bijlages C t/m G. Hierin treft u naast het kosten en baten overzicht ook jaarbelastingduurkrommes aan met daarin de inzet van WK in de energiehuishouding. Tevens zijn hierin de uitwerkingen van de gevoeligheidsanalyses opgenomen

9. Marktpotentieel, een eerste verkenning

Op basis van de resultaten van de haalbaarheidsberekeningen (hoofdstuk 9) wordt in dit hoofdstuk het marktpotentieel geraamd voor de in deze studie beschouwde ORC (circa 175 kWe) in Nederland. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt tussen nieuwbouw -en retrofitsituaties.

Nieuwbouw

Voor de analyse van de nieuwbouwsituaties is in deze studie uitgegaan van de benadering dat een nieuwe WK hetzelfde elektrisch vermogen heeft als een WK met een ORC. Op basis van deze uitgangspunten lijkt een wat grotere WK-installatie gunstiger dan de combinatie WK met ORC met hetzelfde elektrisch vermogen. In werkelijkheid zullen er toch wel enkele mogelijkheden ontstaan voor toepassing van de beschouwde ORC, met name daar, waar een hoge kracht/warmte verhouding wordt gevraagd en waar de warmte niet mag worden weggekoeld. Op basis van deze benadering (een gelijk elektrisch vermogen) ramen wij het marktpotentieel in de nieuwbouw vooralsnog op "te verwaarlozen".

De mogelijkheden zoals hierboven genoemd (een hoge kracht/warmte verhouding en niet mogen wegkoelen van warmte) kunnen leiden tot een andere benadering van de nieuwbouw van ORC met WK. Hierbij is het thermische vermogen van een nieuwe WK gelijk aan het thermische vermogen van de combinatie van een grotere WK met een ORC. De combinatie WK/ORC levert dan bij een gelijk thermisch vermogen meer elektriciteit. In sectoren met hoge kracht/warmteverhouding van de energiebehoefte (tuinbouw, universiteiten) kan deze methode voordeling zijn vanwege de extra vermeden inkoop van elektriciteit. Zodra de extra elektriciteit moet worden geleverd aan het net is deze optie minder interessant.

Het marktpotentieel op basis van deze 'tweede benadering' (een gelijk thermisch vermogen) is moeilijk te kwantificeren omdat dit in deze studie niet nader uitgewerkt is. Er lijkt wel degelijk een potentieel te bestaan voor een dergelijke combinatie van ORC met WK.

Retrofit

In de retrofit situatie is er sprake van een al bestaande WK-installatie. De rekenresultaten van hoofdstuk 9 laten zien, dat een nageschakelde ORC voldoende aantrekkelijk kan zijn indien de extra geproduceerde kWh's voor eigen gebruik kunnen worden ingezet en de vrijkomende lage temperatuur warmte nuttig kan worden gebruikt. Potentieel interessante sectoren zijn:

- a. de belichtende glastuinbouw met WK-installatie van zo'n 1,5 MWe of meer, waar warmte wordt vernietigd en voldoende extra elektriciteit nodig is / wordt ingekocht;
- b. de grotere gebouwcomplexen met een WK-installatie van zo'n 1,5 MWe of meer, waar voldoende extra elektriciteit nodig is / wordt ingekocht ;
- c. industriële bedrijven, waar er sprake is van hoge temperatuur afvalwarmte van voldoende omvang (1.050 kWth voor ORC) en van voldoende extra elektriciteitsbehoefte.

In drie bovenstaande sectoren zal in het algemeen sprake zijn van een redelijke bedrijfstijd (bedrijfstijd groter dan 5.000 uren/jaar).

9.1 Glastuinbouw

Het marktpotentieel voor de ORC in de glastuinbouw ligt voornamelijk bij tuinders met belichte teelten en een eigen WK. In deze groep is doorgaans sprake van een hoge

bedrijfstijd (> 4000 uur) door de combinatie van draaiuren voor belichting en draaiuren voor rookgasreiniging. Het marktpotentieel voor deze groep wordt hieronder uitgewerkt.

In 2003 bedroeg het areaal belichte teelt circa 1910 hectare in Nederland. Bijna 670 ha van dit areaal kan niet als potentieel worden aangemerkt omdat het belichtingsvermogen te laag is of er onvoldoende oppervlakte is. De belangrijke teelten voor de ORC beslaan circa 1240 hectare. Hierbij is roos met 800 ha de grootste groep. De totale onderverdeling van deze 1240 hectare belichte teelt is hieronder gegeven :

Belichte teelt In 2003	Oppervlakte belichte teelt (hectare)	Belichtingsvermogen (kWe/ha)
Tomaat	30	550 tot 900
Roos	800	550 tot 900
Chrysant	350	400
Gerbera	60	400

Tabel 16. De belangrijkste belichte teelten in 2003

Voor de bepaling van het potentieel voor de ORC geldt dat de grotere tuinders interessant zijn (oppervlakte > 2 hectare bij roos en tomaat; > 5 hectare bij chysant en gerbera). Door het grotere oppervlak is het WK vermogen groot genoeg. Grotere tuinders zijn ook vaak 'koploper' in hun vakgebied, en zeer innovatief ingesteld. Hierdoor zullen ze relatief vaker een rookgasreiniger hebben en zullen ze eerder in nieuwe technologie investeren.

Tomaat

In de tomatenteelt was er in 2003 een kleine groep tuinders die met belichting werkte (30 ha ten opzichte van in totaal 1200 ha tomatenteelt (gegevens LEI)). In de groep belichtende tuinders gebruikt vrijwel elke tuinder een of meerdere WK's in combinatie met rookgasreiniging. Alle tuinders die momenteel belichten hebben grote kassencomplexen, waarbij er een onbelicht gedeelte is in het totale complex. Er wordt doorgaans gewerkt met een combinatie van elektriciteitsinkoop uit het net en elektriciteit uit eigen WK. Er is hier uitgegaan van een gemiddeld vermogen van de WK's van 0,7 MW/ha. Het opgesteld WK vermogen in 2003 bedraagt dan 21 MWe.

De groep tuinders die tomaten belicht groeit erg sterk. In de eerste helft van 2004 is er nog circa. 45 MWe bijgeplaatst in de belichte tomatenteelt (gegevens Hanwel). In totaal staat er dus momenteel circa. 66 MWe. Voor de ORC is een gasmotor van minimaal 1,5 MWe benodigd; daaruit volgt voor het areaal op dit moment een potentieel voor ruim 40 ORC's.

Roos

Voor de 800 hectare roos is er vanuit gegaan dat alleen bedrijven van 2 hectare en groter voldoende elektriciteitsvraag hebben voor een combinatie van een WK met een ORC. In totaal zijn dit ongeveer 175 bedrijven (CBS), in totaal *minimaal* 440 hectare. Met een gemiddelde belichtingsvraag van 0,7 MWe per hectare levert dit een totale gesommeerde elektriciteitsvraag van ca. 300 MWe voor deze groep. De penetratiegraad van WK in deze groep is hoog (ca. 75%). Er Als we er vanuit gaan deze groep 70% van zijn elektriciteitsbehoefte voorziet met WK, dan staat er ongeveer 160 MWe opgesteld WK vermogen.

Het gebruik van WK in combinatie rookgasreiniging is echter minder; van de tuinders met WK in de rozenteelt heeft slechts 25% een rookgasreiniger. Voor de grotere tuinders zal dit percentage wat hoger liggen, circa 40%. Onze inschatting is dat 40 tot 60

MWe voorzien is van een rookgasreiniger. Dit biedt een potentieel voor 25 tot 40 ORC's,

Het resterende opgesteld vermogen bij de rozentelers (100 tot 120 MWe) draait zonder rookgasreiniger. Bij een voldoende lage prijs van de ORC biedt dit een additioneel potentieel voor circa 60 ORC's.

Chrysant en gerbera

De totale oppervlakte van chrysant en gerbera bedraagt 410 hectare. Op basis van de belichtingsvraag zijn alleen bedrijven groter dan 5 hectare interessant omdat anders de WK te klein is voor de ORC. Volgens gegevens van het CBS zijn dit 17 bedrijven. De totale oppervlakte bedraagt hier minimaal 85 hectare, oftewel circa 34 MWe. De penetratiegraad van WK met rookgasreiniger bij deze typen teelt is echter laag. Als 50% een WK heeft bedraagt het potentieel ongeveer 10 ORC's.

WK's van energiebedrijven bij niet belichtende tuinder

In de studie is alleen gekeken naar de combinatie van een ORC met een WK bij de belichtende tuinders. De WK is dan doorgaans eigendom van de tuinder zelf. Daarnaast is er een tweede groep WK's in de tuinbouw, te weten de WK's van energiebedrijven bij niet belichtende tuinders (groentetelers). Deze WK's leveren warmte aan de tuinder en de elektriciteit aan het net en worden doorgaans aangestuurd op warmtevraag. Hoewel hier in de studie niet naar gekeken is, wordt deze groep hier nu kort besproken.

In deze groep van WK's van energiebedrijven zijn de WK's met rookgasreiniger interessant (circa 120 stuks in 2003) omdat alleen dan een groot genoeg aantal draaiuren gemaakt kan worden (groter dan 3500 uur). De installaties zonder rookgasreiniger staan stil gedurende de zomer omdat de tuinder zelf zijn ketel stookt voor CO₂ doseren én daardoor tegelijkertijd warmte tot zijn beschikking heeft.

Op basis van eerdere studies van Cogen Projects en gegevens uit de markt is aangenomen dat circa 20% van de WK's met rookgasreiniger van energiebedrijven groot genoege is om een ORC aan te drijven. Het marktpotentieel voor de ORC bedraagt dan 24 ORC's bij de WK's van energiebedrijven.

Voor de WK's van energiebedrijven in de tuinbouw geldt echter dat er weinig geïnvesteerd wordt en er eerder vermogen wordt afgebouwd. De opbrengsten van het huidige WK park van energiebedrijven in de tuinbouw zijn te laag voor de energiebedrijven. Het marktpotentieel voor de ORC is hierdoor wel een technisch potentieel, maar geen economisch potentieel, gegeven de huidige tarieven voor gas en elektriciteit, en de huidige systematiek voor beloning van een hoog rendement.

Conclusie tuinbouw

Het potentieel voor de ORC in de tuinbouw is als volgt opgebouwd.

- Bij tuinders met rookgasreiniging (tomaat, roos) **65 tot 80**
- Bij tuinders zonder rookgasreiniging (roos, chrysant, gerbera) **70**

Het marktpotentieel voor een retrofit-situatie in de tuinbouw bedraagt op basis van het areaal in 2004 ruim **140** ORC's (exclusief het technische potentieel van **24** ORC's bij energiebedrijven)

Toekomstperspectief tuinbouw

Voor de toekomst wordt verwacht dat het areaal groeilicht in de glastuinbouw tot 2010 verder toe zal nemen tot 3900 hectare bij gematigde groei tot of zelfs 5000 hectare bij optimistische groei (*Toekomstvisie glastuinbouw in Nederland en effecten voor de CO₂-emissie, KPMG, 2004*). De groei van het areaal betreft met name de belichte groente-

teelt (tomaat, komkommer, paprika). Ook zal de belichtingsintensiteit bij alle belichte teelten verder toenemen.

De toename van de belichtingsintensiteit biedt een goed perspectief voor de ORC. Bij een stapsgewijze toename zal er behoefte zijn aan kleine uitbreidingen van het elektrisch vermogen, waarbij er tevens behoefte is aan verkleining van de warmteproductie van de WK. Dit lijkt een goede kans voor de ORC.

9.2 Gebouwcomplexen

Totale warmteproductie van WKC en ORC bedraagt (zie schema) 1.490 kWth (waarvan 540 kWth met ca 50^o C). Tegelijkertijd produceren gasmotor en ORC samen 1.560 kWe.

De bedrijfstijd van de – seizoensgebonden - warmtevraag in gebouwen is veel lager dan die van de elektriciteitsvraag. Om in de buurt van een warmtevraag van zo'n 1.500 kWth met een bedrijfstijd van T=5000 uren/jaar te komen zal de maximale warmtevraag minstens 10.000 kWth moeten bedragen; dit komt overeen met ca 1.200 Nm³/hr aardgas. Gegeven de belasting/duur kromme in gebouwen betekent dat een jaarverbruik in de orde van 4 mln Nm³/jr.

Gegeven de elektriciteitsproductie van 1560 kWe en het elektriciteitsafnamepatroon in gebouwen, moet er een elektriciteitsvraag zijn van ca 10 mln kWh per jaar.

Dergelijke energieverbruiken komen weinig voor in de gebouwde omgeving, alleen bij grote gebouwcomplexen, zoals universiteiten, zeer grote kantoren en winkelcentra. Daarbij is het de vraag of de ORC in alle gevallen de beste optie is; dat kan alleen een gerichte haalbaarheidsstudie uitwijzen. Wij gaan voorsnog voor het marktpotentieel in de gebouwde omgeving uit van enkele tientallen eenheden.

9.3 Industriële bedrijven

Bedrijven met een WK-installatie op basis van een gasturbine zijn praktisch uitsluitend industriële bedrijven, waarbij de WK-installatie is gedimensioneerd op de warmte/stoom - behoefte. Hoge temperatuur afvalwarmte - stromen van 1.050 kWth en een bedrijfstijd van minstens 5.000 uren/jaar komen hier niet of nauwelijks voor.

9.4 Mogelijke toepassingsvelden buiten warmte/kracht

Hoewel buiten de scope van deze studie, wordt hier ook – in het belang van de verdere ontwikkeling van de ORC – aandacht gevraagd voor mogelijke toepassingsvelden buiten warmte/kracht. Als zodanig noemen wij:

Glasindustrie

Om een idee te krijgen over het potentieel in de glasindustrie zijn gegevens ontleend aan een Needis met rapportnummer NDS--96-013 (April 1997, Sectorstudie Bouwmaterialen, ing. M.P. van de Bank, ir. H.M. Venderbosch). Uitgaande van de daarin vermelde productie van 1,2 mln ton glas/jaar (m.b.v. 25 glasovens), van een energieverlies in de afgassen van 0,69 GJ/ton glas en van een bedrijfstijd van 8.000 uren/jaar berekenen wij een energieverlies in afgassen van 285 MWth. Met een vermogensbehoefte van 1,05 MWth per ORC zou er een energetisch potentieel zijn van 270 ORC's. Welk deel van hiervan als realistisch kan worden aangemerkt vereist een (veel) verder gaand onderzoek dan in het kader van deze studie mogelijk is.

Keramische industrie

In het TNO-MEP rapport R99/072 (Mei 1999, Methodiekontwikkeling procesgeïntegreerde energiebesparingsopties voor bestaande bedrijven in de sector Bouwkeramiek, fase 1, Ir. J.B. de Wit) over energiebesparingsopties in de sector bouwkeramiek is

de ORC vergeleken met andere energiebesparing - mogelijkheden. Ondanks een terugverdientijd van 3,5 jaar wordt de ORC niet tot kansrijke opties gerekend omdat andere opties, zoals toerenregeling ventilatoren, vermindering luchtlekage en WK aantrekkelijker zijn.

Gieterijen

In een Novem rapport (Juli 2004, Restwarmtebenutting voor de AVNEG', Ir.S.D. Strating-Ytsma) voor de AVNEG (Algemene Vereniging van Nederlandse Gieterijen) wordt ook aandacht besteed aan de mogelijke inzet van een ORC. De conclusie daaromtrent is: "Zolang de geproduceerde elektriciteit niet als groen stroom verkocht kan worden, is de toepassing van een ORC niet haalbaar".

Overige industriële restwarmte

Volgens het ECN rapport ECN-RX-02-037 (sept. 2002, Solid sorption based heat transformers for application in industrial processes, W.G. Haije, J.B.J. Veldhuis, K. Brandwagt, J.W. Dijkstra) bedraagt de industriële restwarmte iets van 100 PJ op jaarbasis. Daarvan is in het Europoort/Botlek - gebied 40 PJ/jaar bij een temperatuur tussen 50 en 200 °C. Dat zou betekenen dat er minimaal 60 PJ op jaarbasis aan restwarmte bij een temperatuur boven 200 °C en onder 50 °C wordt geloosd.

Dit houdt een mogelijk marktpotentieel voor de ORC in. De grootte van dit potentieel is echter op dit moment niet te bepalen.

Naast de vier bovengenoemde velden van industriële afvalwarmte zijn de onderstaande toepassingen ook zeker van belang voor de ORC:

- situaties met "off spec fuels", zoals fakkelgas en stortgas;
- kleinschalige verbranding of vergassing van biomassa;
- kleinschalige "stand alone" elektriciteitsopwekking.

9.5 Groene elektriciteit

Een van de grote voordelen van de ORC is, dat er geen inwendige verbranding plaats vindt. Als de voor de ORC benodigde warmte met biobrandstoffen kan worden opgewekt, dan produceert de ORC groene warmte en groene elektriciteit. Afhankelijk van de brandstofkosten kan in dat geval de rentabiliteit aanzienlijk verbeteren door de hogere opbrengst van de ORC. Dit punt valt buiten de scope van deze studie, maar kan van wezenlijk belang zijn voor de verdere ontwikkeling van de beschouwde ORC.

9.6 Conclusie marktpotentieel

Op grond van deze eerste – globale - verkenning van het marktpotentieel trekken wij de volgende conclusies:

1. Het meest concrete potentieel ligt in de glastuinbouw, met tot een maximum van 170 ORC's op basis van de huidige situatie.
2. Om voor de sector gebouwen tot een betrouwbare potentieelraming te komen is veel nader onderzoek nodig. Zodra meer bekend is van de prijs/prestatie verhouding van de ORC kan dergelijk onderzoek zinvol zijn.
NB: Dan is het verstandig daarin ook de voordelen van CO₂ emissiehandel te waarden (thans geraamd € 10 per voor het jaar 2010)
3. Naast warmte/kracht zijn er zeker ook andere interessante toepassingsmogelijkheden van de ORC.
4. Indien de door de ORC geproduceerde elektriciteit als groene stroom wordt gewaardeerd, dan wordt het marktpotentieel voor de ORC aanzienlijk groter.

10. Energie en milieuvoordeel ORC

Op basis van het marktpotentieel (zie het voorgaande hoofdstuk) wordt hier het milieuvoordeel van het naschakelen van de ORC aan een WK bepaald. Het milieuvoordeel van de ORC wordt bepaald door twee aspecten. Ten eerste de extra elektriciteit die de ORC produceert. Ten tweede kan een ORC een rol spelen in het beperken of zelfs volledig voorkomen van warmtevernietiging. Dit voordeel is met name van belang in de tuinbouw.

Daar staat echter tegenover dat als de ORC nuttige warmte uit de WK gebruikt (die anders wél ingezet zou worden, deze warmte op een andere wijze zal moeten worden opgewekt. Wij nemen voor de berekening van het milieuvoordeel aan dat dit zal gebeuren met een ketel met een rendement van 92% (o.w.).

Tuinbouw

Gegeven een effectief vermogen van de ORC van 162 kWe en tussen de 4000 en 6000 draaiuren betekent dit per geïnstalleerde ORC per jaar gemiddeld 815.000 extra kWh's (op basis van 5000 uur). Het referentierendement voor het gemiddelde elektriciteitsproductiepark is momenteel circa 42% (op basis van de brandstofmix in Nederland, exclusief import).

Als we er vanuit gaan dat de ORC met afvalwarmte wordt aangedreven geldt de onderstaande berekening: Op basis van geproduceerde elektriciteit is er een vermeden primaire brandstofinzet per ORC van circa 1,94 mln kWh brandstof (815.000 kWh tegen 42% rendement). Omgerekend naar gas is dit 220.662 m³ aardgas per ORC, oftewel 397.192 kg CO₂ per ORC (te weten 1,8 kg CO₂ per m³ aardgas). Bij 140 ORC's betekent dit een jaarlijkse besparing van 55.000 ton CO₂ (op basis van aardgas). Als we uitgaan van de brandstofmix die wordt toegepast in Nederland is de uitstoot 0,65 kg CO₂ per opgewekte kWh. Aangezien de elektriciteit uit de ORC zonder extra brandstof wordt opgewekt betekent dit een vermindering per jaar van circa 74.000 ton CO₂ (op basis van brandstofmix).

Als de ORC nuttige warmte gebruikt om elektriciteit mee te maken in plaats van afvalwarmte dient voor de extra gasinkoop van de ketel gecorrigeerd te worden. De extra gasinkoop bedraagt in met het huidige warmteverbruik van de ORC 190 kWth (175 kW / 92%), oftewel 951.086 kWh (brandstof). Dit komt overeen met 108.180 m³ aardgas per jaar. De CO₂ besparing bedraagt dan 202.467 kg CO₂ per jaar per ORC. Bij 140 ORC's is dit een totale besparing na aftrek van extra brandstofinzet van circa 28.000 ton CO₂ per jaar (ten opzichte van eerst 55.000 ton). Op basis van de brandstofmix is jaarlijkse besparing bij nu 47.000 ton CO₂ (ten opzichte van eerst 74.000 ton).

Als extra milieuvoordeel in de tuinbouw kan de ORC warmtevernietiging voorkomen. Uit de simulaties is gebleken dat, afhankelijk van de inpassing van de WK, er tot 23 m³/m² warmtevernietiging voorkomen kan worden (aardgas equivalenten). Hierbij dient aangetekend te worden dat dit sterk afhankelijk is van de gebruikte aannames en de dimensionering van de bestaande WK.

Overige sectoren

Het milieuvoordeel voor de overige sectoren in deze studie is op basis van het marktpotentieel moeilijk te geven. De aantallen variëren van enkele tientallen tot in het gunstigste meer dan 200.

Als we uitgaan van 200 ORC's in verschillende sectoren, dan is het milieuvoordeel als volgt: Als de ORC gebruik maakt van anders nutteloze warmte is het milieuvoordeel zeer aanzienlijk (>75.000 ton CO₂ besparing per jaar, op basis van een vergelijking met aardgas). Bij inzet van warmte die anders nuttig gebruikt zou worden daalt de CO₂ besparing per jaar naar circa 40.000 ton (eveneens vergeleken met aardgas).

Gebruik van toluen

In de ORC wordt toluen als werkmedium gebruikt. Toluen is chemisch stabiel tot boven 500 °C (hoogste temperatuur in het systeem is 325 °C, en heeft een veiligheidsklasse die vergelijkbaar is met die van gasolie of benzine. Hoewel langdurige blootstelling aan hoge concentraties de gezondheid kan schaden, wordt toluen, i.t.t. benzeen, niet als carcinogeen aangemerkt.

De cyclus vindt plaats in een hermetisch gesloten systeem, inclusief de turbogenerator/pomp combinatie. Er zijn geen doorvoeringen van assen, geen tandwielkast, terwijl voor de smering het kringloopmedium gebruikt wordt. Het gehele systeem kent twee circulerende fluïda, het kringloopmedium toluen en het koelwater (evt. met antivries) voor de condensorkoeling. Er is geen smeerolie, en dus ook geen smeerolieverbruik. Het systeem heeft een voorziening, die in geval van demontage van de turbogenerator voor inspectie en/of revisie, er voor zorg draagt dat er geen werkmedium naar de atmosfeer ontsnapt.

Het systeem is beveiligd tegen ontsnappend toluen. In de procesruimte is detectieapparatuur aanwezig, die de installatie stil legt, indien de concentratie toluen boven 500 ppm komt. Bij 50 ppm (MAC - waarde) volgt een alarmering. De LEL (Lower Explosion Limit) blijkt uit onderstaande tabel, ontleend aan [1]¹⁰, een waarde te hebben van 14.000 ppmv.

Stof	Lower Explosion Limit [volume %]	Higher Explosion Limit [volume %]
Waterstof	4,1	74,2
Ammonia	15,0	28,0
Methaan	5,3	14,0
Propaan	2,3	9,5
Butaan	1,9	8,5
Toluene	1,4	6,7
Benzine	1,3	7,0
Kerosine	0,7	5,6
Dieselolie	6,0	13,5

Tabel 17. De 'Explosion Limit' van toluen in vergelijking met andere stoffen

In de controleruimte kan voortdurend de aanwezigheid van toluen worden afgelezen. In het prototype is 0 ppm de gebruikelijke waarde.

Het volume toluen aanwezig in de installatie is laag: ca. 200 kg.

De installatie wordt ontworpen met in acht name van de PED (stoomwezen regels).

Er is een risico analyse gemaakt. Waar nodig is alle apparatuur explosie veilig uitgevoerd.

¹⁰ [1] Coulson & Richardson's Chemical Engineering, Volume 6, 3rd edition.

11. Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de uitgangspunten van deze studie en de daaruit volgende simulaties en rentabiliteitsberekeningen en gevoeligheidsanalyse formuleren wij de volgende conclusies en aanbevelingen:

Conclusies

- (I.) Op basis van de SPOT (Simple Pay Out Time) kan geconcludeerd worden dat de meest gunstige toepassing voor de ORC in een retrofitsituatie in de tuinbouw lijkt te liggen. De redenen hiervoor zijn dat de tuinbouwcase een hoge bedrijfstijd heeft voor de gekozen teelt (roos) en het gebruik van rookgasreiniging. Tevens is er in deze sector sprake van een zeer vlakke afname: voor de belichting wordt altijd het maximale piekvermogen gevraagd.
- (II.) In nieuwbouwsituaties zal de combinatie van een ORC met een WK moeten concurreren met een nieuwe WK. De nieuwe WK zal hetzelfde elektrisch vermogen leveren als de combinatie van de ORC met een (andere) WK. Het lijkt in alle gevallen economisch gunstiger te zijn om een nieuwe WK aan te schaffen met een groter vermogen, dan om een WK te combineren met een ORC. Hierbij is geen rekening gehouden met externe drijfveren (bijvoorbeeld een verbod op warmtevernietiging).
- (III.) Het energieverbruik in een bepaalde sector moet groot genoeg zijn om een ORC in combinatie met een WK gasmotor te kunnen plaatsen. Dit heeft te maken met het thermisch vermogen dat een gasmotor moet kunnen leveren aan deze ORC. In deze studie bleek de gasmotor bij hotels en zorghuizen over het algemeen te klein om de Tri-O-Gen ORC van voldoende warmte te voorzien.
- (IV.) Het lijkt goed mogelijk de ORC te simuleren in Cycle Tempo. De eerste vergelijking van het model met de werkelijkheid geeft een positieve indruk. Eventuele verschillen van de uitkomsten van de simulatie met meetwaarden uit de praktijk zijn zeer acceptabel te noemen, temeer omdat ze goed verklaarbaar zijn. Verder is het model nooit eerder geoptimaliseerd aan de hand van meetgegevens, waardoor enige mate van discrepantie haast niet uit te sluiten is. Er is een krachtig gereedschap ontwikkeld voor verdere analyses.
- (V.) De 'succesfactoren' voor de ORC zijn als volgt samen te vatten:
 - Een huidige WK met een laag elektrisch rendement. (Bijvoorbeeld in de case van de universiteit). Door het lage elektrische rendement van de bestaande WK is er ruimte voor verbetering met een ORC
 - Een huidige situatie waarbij de WK niet optimaal gedimensioneerd is. (bijvoorbeeld de universiteitscase) Hoewel de WK op zichzelf al behoorlijk wat voordeel oplevert, kan een ORC bijdragen aan extra voordeel ten opzichte van gescheiden inkoop. Dit in tegenstelling tot de case van de ziekenhuizen, waarbij de huidige WK al optimaal gedimensioneerd lijkt.
 - Een energiehuishouding waarbij het gebruik van elektriciteit ten opzichte van warmte zeer hoog is, zie hiervoor de tuinbouw. In deze gevallen is vermeden inkoop van elektriciteit veel waard.
 - Een situatie waarbij sprake is van warmtevernietiging. Dit komt doorgaans doordat de WK te groot is of omdat de WK alleen ingezet wordt voor elektriciteitslevering, hoewel dit maar zeer zelden voor zal komen. In deze gevallen is de naschakeling van een ORC zeer gunstig.

(VI.) Uit de rentabiliteitsberekeningen en de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de waarde van de warmte die de WK levert zeer belangrijk voor de rentabiliteit van de ORC. De waarde van de warmte wordt onder meer bepaald door:

- De warmtevraag als functie van de tijd
- het temperatuurniveau waarop de warmte geleverd wordt (zie hiervoor de ziekenhuiscase en de gasturbinecase)
- wel of niet warmte vernietiging in de uitgangspunten (zie hiervoor de tuinbouwcase en gasturbinecase)

Tevens blijkt een lage temperatuurconditie van de ORC niet gunstig in een situatie waar warmte op een hoge temperatuur gevraagd wordt (circa 90° C) en waar de waarde van de warmte hoog is.

(VII.) Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de volgende invloedsfactoren van belang zijn voor de rentabiliteit van de ORC:

- De waarde van de warmte die ingezet wordt ten behoeve van de ORC. De belangrijkste aspecten hierbij zijn: wel of niet warmte vernietiging en het temperatuurniveau waarop de warmte geleverd wordt in combinatie met de condensorconditie van de ORC
- De hoogte van de investering. Het is nog niet geheel duidelijk wat de uiteindelijke kostprijs van de ORC gaat zijn bij voldoende productieaantallen. Als de kostprijs voldoende laag wordt de ORC (uiteraard) interessanter
- Het aantal draaiuren van de WK/ORC. Als deze te laag zijn neemt het voordeel van ORC sterk af.

Andere gevoeligheden zijn gelegen in de hoogte van de gasprijs, elektriciteitsprijs en de efficiency van de ORC.

(VIII.) Op grond van een eerste – globale - verkenning van het marktpotentieel zijn de volgende conclusies getrokken wat betreft het marktpotentieel :

- Het meest concrete potentieel ligt in de glastuinbouw, met tot een maximum van 170 ORC's op basis van de huidige situatie.
- Om voor de sector gebouwen (ziekenhuizen en universiteiten) tot een betrouwbare potentieelraming te komen is veel nader onderzoek nodig. Zodra meer bekend is van de prijs/prestatie verhouding van de ORC kan dergelijk onderzoek zinvol zijn.
NB: Dan is het verstandig daarin ook de voordelen van CO₂ emissiehandel te waarderen (thans geraamd op € 10 per vermeden ton CO₂). Ter vergelijking: de kosten van CO₂ verwijdering uit rookgassen met huidige technologie bedragen € 40 - € 60 per ton (afhankelijk van de gebruikte brandstof).
- Naast warmte/kracht zijn er zeker ook andere interessante toepassingsmogelijkheden van de ORC.
- Indien de door de ORC geproduceerde elektriciteit als groene stroom kan worden gewaardeerd, dan wordt het marktpotentieel voor de ORC aanzienlijk groter.

(IX.) Het milieuvoordeel van de ORC is het grootst als deze met afvalwarmte wordt aangedreven. Op basis van de brandstofmix bedraagt de besparing circa 528 ton CO₂ per ORC per jaar. Wordt de ORC aangedreven met 'nuttige' warmte dan is de besparing nog steeds circa 335 ton per ORC per jaar

Aanbevelingen

Het onderzoek heeft op vele vragen antwoord gegeven. Binnen het kader van het project zijn echter nieuwe vragen gerezen, die verdere uitwerking vereisen:

- A. Niet alle succesfactoren voor de adequate introductie van de ORC in WK toepassingen konden worden geïventariseerd, mede door de gekozen case-by-case benadering. Additioneel onderzoek, enerzijds toespitst op één toepassingsgebied is raadzaam. Anderzijds zou in breder verband naar kritische succesbepalende kentallen moeten worden gezocht.
- B. Door de gekozen economische benadering, vanuit de huidige randvoorwaarden, zijn de milieuvoordelen van de ORC onvoldoende tot hun recht gekomen. Nader onderzoek naar de effecten van milieutechnische waardering, bijvoorbeeld in de CO₂ index en/of in het effect van de handel in emissierechten voor NO_x en CO₂, is noodzakelijk.
- C. Een geheel nieuw product als de Tri-O-Gen ORC kan pas tegen een acceptabel investeringsniveau geleverd worden, nadat via hoge productie-aantallen en 'learning-curve' effecten de kostprijs tot dat niveau gedaald is. Met name de voorziene 0-serie moet hieraan bijdragen. Dit rapport is richtinggevend voor de selectie van toepassingsgebieden. Het verdient aanbeveling in de onderzochte marktgebieden de meest kansrijke projecten hiervoor te identificeren.
- D. Er blijkt een aantal toepassingen te bestaan voor de ORC variant met hogere condensorcondities. Het verdient aanbeveling deze variant te ontwikkelen, zolang dat het te leveren elektrisch vermogen op het nominale peil blijft van bruto 175 kWe, tegen minimale reductie van het ORC rendement.
- E. De in het rapport naar voren gekomen mogelijke toepassing in glasindustrie, keramische industrie en gieterijen, alsmede toepassing voor brandstoffen uit biomassa en afval, dienen nader onderzocht te worden op hun technische en economische haalbaarheid.
- F. In de tuinbouw wordt vaak gewerkt met de combinatie van een ketel en een WK. Als de ketel in de zomer wordt gebruikt om CO₂ mee te doseren kan de warmte hiervan ook worden ingezet om de ORC aan te drijven. De voordelen hiervan zijn dat een eventueel warmteoverschot uit de ketel wordt beperkt en de bedrijfstijd van de ORC wordt verlengd. Het verdient aanbeveling om deze mogelijkheid in een vervolgstudie nader uit te werken.
- G. Voor de analyse van de nieuwbouwsituaties is in deze studie uitgegaan van de benadering dat een nieuwe WK hetzelfde elektrisch vermogen heeft als een WK met een ORC. Een andere benadering zou zijn om het geleverde thermisch vermogen van een nieuwe WK gelijk te stellen aan het thermische vermogen van de combinatie van een grotere WK met een ORC. Deze combinatie WK/ORC levert dan bij een gelijk thermisch vermogen meer elektriciteit. Deze benadering is in deze studie niet verder uitgewerkt maar lijkt een interessante optie voor de toepassing van de ORC.