

Microgasturbine voor laagcalorisch stookgas uit biomassa

L.P.L.M. Rabou

J.M. Grift (Cogen Projects)

R.E. Conradie (HoSt)

S. Fransen (Pon Power)

Verantwoording

Dit rapport vormt het eindverslag van het project "Microgasturbine voor laagcalorisch stookgas uit biomassa". Dit project is deels gefinancierd door SenterNovem onder projectnummer P2020-03-11-14-003, deels uit ECN Samenwerkingssubsidie onder projectnummer 7.5261, en deels uit eigen bijdragen van projectpartners Cogen Projects, HoSt en Pon Power.

Abstract

A Capstone micro gas turbine has been operated on various mixtures of natural gas and producer gas from biomass gasification. Stable operation with low emissions was shown feasible, requiring only limited modification of the software settings. The micro gas turbine can deliver full design power if the lower heating value of the gas mixture is at least 15 MJ/Nm³. Stable operation on gas with lower heating value between 8 and 15 MJ/Nm³ is possible too, but the power output is limited as the fuel delivery system cannot cope with the required larger gas volumes. We assume future applications will be based on a gasification process able to deliver gas with sufficiently high heating value to allow operation at full power, e.g. indirect (allothermal) gasification.

On inspection of the micro gas turbine a loose yellowish powder was found on surfaces near the burner. This may cause problems on prolonged operation and requires further attention. However, if it results from the presence of small amounts of H₂S in the product gas, the problem can be solved by the use of the specially adapted sour gas version of the Capstone micro gas turbine.

A market study into application of the combination of micro gas turbines and biomass gasification shows the best opportunities to be in the horticultural sector. The high heat/power ratio makes application most attractive at sites where electricity is not used for artificial lighting to increase plant productivity. The value of electricity has been calculated correspondingly from feed-in tariffs plus MEP subsidy as applies presently to small biomass fired installations in the Netherlands. For installations matched to the average heat demand in the summer months the simple payback time of investment equals 6 years. For a similar installation with gas engine, the result is 4.7 years. For comparison, the simple payback time of a gas engine on natural gas, for which MEP subsidy does not apply, is calculated to be 5.5 years.

The market for this type of installations is estimated at nearly 200 installations with 3 MW_{th} biomass gasifiers. Whether that potential will be realised depends on the continuation of the MEP subsidy scheme and the due availability of biomass gasifiers with matching gas cleaning systems.

Keywords

Biomass gasification
Combined heat and power
Gas engine
Gas turbine

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	6
1. Inleiding	7
2. Experimentele installatie	9
2.1 Vergasser en gasreiniging	9
2.2 Infrastructuur gas	10
2.3 Microgasturbine	13
3. Experimentele resultaten	16
3.1 Vermogen	16
3.2 Rendement	17
3.3 Emissies	19
3.4 Stabiliteit	21
3.5 Vervuiling	26
4. Marktstudie	28
5. Conclusies	31
Referenties	32
Bijlage A: Marktonderzoek	34

Lijst van tabellen

Tabel 2.1	<i>Gemiddelde samenstelling productgas uit Bivkin vergasser na OLGA en Gasreip gasreiniging.</i>	9
Tabel 4.1	<i>Investeringsen per hectare voor verschillende systemen.</i>	29
Tabel 4.2	<i>Kosten en opbrengst per hectare per jaar voor verschillende systemen.</i>	29

Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>Schematische weergave van leidingwerk voor productgas en aardgas via compressor naar microgasturbine.</i>	10
Figuur 2.2	<i>Handafsluiters in leidingen voor aardgas (links) en productgas (rechts). Na de handafsluiters zijn veiligheidskleppen gemonteerd, die sluiten bij gasalarm.</i>	11
Figuur 2.3	<i>Terugslagklep in productgasleiding voor aansluiting op aardgasleiding. Boven de terugslagklep is het aansluitpunt voor drukmeting in de aardgasleiding te zien.</i>	11
Figuur 2.4	<i>Detector voor CO (links onder), noodstopknop (linksboven), detector voor H₂ (rechtsboven) en meldlicht gasalarm (rechtsonder) bij opstelling microgasturbine.</i>	12
Figuur 2.5	<i>Compressor om aardgas en productgas op druk te brengen voor microgasturbine.</i>	12
Figuur 2.6	<i>Flexibele aansluiting gasleiding op microgasturbine.</i>	13
Figuur 2.7	<i>Capstone microgasturbine voor test met aardgas en productgas.</i>	13
Figuur 2.8	<i>Instellen vermogen microgasturbine via bedieningspaneel.</i>	14
Figuur 2.9	<i>Uitlezing geleverd vermogen (boven), turbine inlaat temperatuur en toerental (midden) en stand gasklep (onder) via bedieningspaneel microgasturbine.</i>	14
Figuur 2.10	<i>Rookgasafvoer microgasturbine. Rechts van de afvoer buiten en linksboven bij de afvoer binnen is de flexibele leiding te zien voor het bemonsteren van rookgas.</i>	15
Figuur 3.1	<i>Maximum vermogen als functie van de verbrandingswaarde van een mengsel van aardgas en productgas. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen. Boven 16 MJ/Nm³ gaat het maximum vermogen naar de ontwerpwaarde van 30 kW_e.</i>	17
Figuur 3.2	<i>Maximum bijdrage van productgas op basis van volume of energie als functie van het vermogen. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen.</i>	18
Figuur 3.3	<i>Rendement microgasturbine bij bedrijf op aardgas of op een mengsel van aardgas en productgas. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen.</i>	18
Figuur 3.4	<i>Concentraties O₂ en CO₂ in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of op een mengsel van aardgas en productgas.</i>	19
Figuur 3.5	<i>Concentratie CO in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of een mengsel van aardgas en productgas.</i>	20
Figuur 3.6	<i>Concentratie onverbrande koolwaterstoffen in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas.</i>	20
Figuur 3.7	<i>Concentratie NO in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas. De sprong bij 20 kW_e is het gevolg van schakelen tussen twee verbrandingsmodes.</i>	21

Figuur 3.8	<i>Concentratie NO₂ in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas. De sprong bij 20 kW_e is het gevolg van schakelen tussen twee verbrandingsmodes.</i>	21
Figuur 3.9	<i>Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 5 kW_e op productgas.</i>	22
Figuur 3.10	<i>Concentraties CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 5 kW_e op productgas.</i>	23
Figuur 3.11	<i>Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 7,5 kW_e op menggas met 72% bijdrage (op energiebasis) van productgas.</i>	23
Figuur 3.12	<i>Concentraties CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 7,5 kW_e op menggas met 72% bijdrage (op energiebasis) van productgas. Tijdens laatste 5 minuten bedrijf op aardgas.</i>	24
Figuur 3.13	<i>Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 46% bijdrage (op energiebasis) van productgas.</i>	25
Figuur 3.14	<i>Gehalte CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 46% bijdrage (op energiebasis) van productgas.</i>	25
Figuur 3.15	<i>Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 43% bijdrage (op energiebasis) van productgas.</i>	26
Figuur 3.16	<i>Gehalte CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 43% bijdrage (op energiebasis) van productgas.</i>	26

Samenvatting

Een Capstone microgasturbine is bedreven op diverse mengsels van aardgas en productgas uit biomassavergassing. Aangetoond is, dat stabiel bedrijf met lage emissies mogelijk is met beperkte aanpassingen van de software instellingen. De microgasturbine kan het volle ontwerpvermogen leveren als het gasmengsel een onderste verbrandingswaarde van tenminste 15 MJ/Nm^3 heeft. De microgasturbine is ook stabiel te bedrijven op gas met een verbrandingswaarde tussen 8 en 15 MJ/Nm^3 , maar het vermogen is dan beperkt, omdat het brandstofsysteem het benodigde grotere debiet niet kan verwerken. Wij gaan ervan uit, dat toepassingen gebruik zullen maken van een vergassingsproces dat gas levert van voldoende hoge verbrandingswaarde om bedrijf op vol vermogen mogelijk te maken, bijvoorbeeld indirecte (allotherme) vergassing.

Bij inspectie achteraf van de microgasturbine is op sommige oppervlakken bij de brander een geelachtig poeder gevonden. Dit zou problemen kunnen opleveren bij langdurig bedrijf en vraagt daarom verdere aandacht. Als de kleine hoeveelheid H_2S in het productgas de oorzaak is, kan het probleem opgelost worden door een aangepaste "zuur gas" versie van de Capstone microgasturbine te gebruiken.

Een marktstudie naar toepassing van microgasturbines in combinatie met biomassavergassing geeft aan, dat de tuinbouwsector de beste kansen biedt. Vanwege de hoge warmte/kracht verhouding geldt dat vooral voor bedrijven die de geproduceerde elektriciteit niet gebruiken voor belichting van gewassen. De waarde van elektriciteit is daarom berekend op basis van levering aan het openbare net, met MEP subsidie zoals die geldt voor kleine biomassa installaties. Voor installaties die zijn afgestemd op de gemiddelde warmtevraag in de zomer is de simpele terugverdientijd van de investering 6 jaar. Voor een soortgelijke installatie met gasmotor wordt het resultaat 4,7 jaar. Ter vergelijking, de simpele terugverdientijd komt uit op 5,5 jaar voor een gasmotor op aardgas, waarvoor de MEP subsidie niet geldt.

De markt voor dit soort installaties is geschat op bijna 200 installaties met 3 MW_{th} biomassa vergassers. In hoeverre dat potentieel werkelijk gerealiseerd zal worden hangt af van het voortbestaan van de MEP subsidieregeling en van de tijdige beschikbaarheid van biomassa vergassers met de bijbehorende productgasreiniging.

1. Inleiding

Kleinschalige warmte-kracht installaties die elektriciteit en warmte produceren uit biomassa reststromen kunnen een significante bijdrage leveren aan het realiseren van nationale en Europese doelstellingen voor de productie van energie uit duurzame bronnen. Voor natte reststromen is vergisting veelal de meest effectieve methode om de biomassa bruikbaar te maken. Droge reststromen kunnen worden verbrand of vergast. Vergassing is vooral interessant als tussenstap voor de productie van elektriciteit met behulp van een gasmotor of gasturbine. Op voorhand is te verwachten, dat een gasmotor een hoger elektrisch rendement levert en een gasturbine schoner uitlaatgas. Ook zijn er verschillen in kosten voor aanschaf en onderhoud.

Het doel van dit project is om vast te stellen wat de prestaties en toepassingsmogelijkheden zijn van een microgasturbine bij bedrijf op laagcalorisch stookgas uit vergassing van biomassa. Het project omvat:

- Een test met een complete installatie van biomassavergasser, stookgasreiniging, compressor en een Capstone microgasturbine.
- Een studie naar de Nederlandse markt voor dit soort installaties.

Tijdens de test zal het stookgas worden verrijkt met aardgas om te kunnen voldoen aan de minimale verbrandingswaarde die de fabrikant als specificatie opgeeft. De test heeft als doel om de prestaties van de microgasturbine en de kwaliteit van de uitlaatgassen vast te stellen in en buiten het door de fabrikant opgegeven werkingsgebied. De test heeft ook als doel om ervaring op te doen met de combinatie van biomassavergasser, gasreiniging en toepassing in een microgasturbine en dient als voorstudie voor een systeem met een voor laagcalorisch gas ontworpen microgasturbine.

De marktstudie heeft tot doel duidelijk te maken hoe groot de totale markt is voor biomassa systemen van ongeveer 0,5 MW_e tot 3 MW_e, welke eisen verschillende marktsegmenten stellen aan de installatie en hoe de concurrentiepositie van de microgasturbine is op die markt.

Achtergrond

ECN en HoSt werken al jaren samen aan de ontwikkeling van een wervelbed vergassingsreactor en van de stookgasreiniging (de testinstallaties Bivkin, respectievelijk Gasreip bij ECN). Met de vergasser zijn duizenden uren ervaring met diverse brandstoffen opgedaan. HoSt levert wervelbed vergassers van het type Bivkin op commerciële basis.

Uit vele tests die bij ECN zijn uitgevoerd met Bivkin en Gasreip is een duidelijk beeld naar voren gekomen over de samenstelling van stookgas uit vergassing van biomassa, over de verontreinigingen die in het stookgas voorkomen en over de prestaties van een gasmotor op biomassastookgas. Er zijn ook enkele tekortkomingen duidelijk geworden:

1. Bij gebruik van Gasreip om teer te verwijderen bevat het stookgas nog dampvormige teerverbindingen die kunnen condenseren en problemen veroorzaken als het gas wordt gecomprimeerd en gekoeld.
2. De uitlaatgassen van de gasmotor bevatten hoge concentraties aan CO en onverbrande koolwaterstoffen. Er zijn mogelijk aanvullende maatregelen nodig om te voldoen aan emissie-eisen en zeker om de uitlaatgassen te kunnen toepassen voor CO₂ bemesting.

Het eerste punt is ondervangen met de OLGA technologie die ECN heeft ontwikkeld in samenwerking met Dahlman. Voorafgaand aan het huidige project is een OLGA installatie gebouwd en geoptimaliseerd achter de 500 kW_{th} vergasser van ECN. De optimalisatie heeft

meer tijd geleverd dan in het voorstel voor het huidige project was voorzien. Uiteindelijk is begin 2006 een duurttest uitgevoerd, waarbij ook een gasmotor ruim 500 uur op schoon stookgas is bedreven. Aan het eind van de duurttest zijn voor dit project tests met een Capstone microgasturbine uitgevoerd.

Het tweede punt is inherent aan de bouw en werking van gasmotoren. Ongeveer 1% van de brandstof komt onverbrand of onvolledig verbrand in de uitlaatgassen terecht. Het probleem treedt ook op bij bedrijf op aardgas, maar in versterkte mate bij bedrijf op stookgas, omdat het een aanzienlijk percentage CO bevat en een groter deel van het volume aan uitlaatgassen levert. Naar verwachting presteert een gasturbine op dat punt veel beter. Eén van de doelstellingen van dit project is om dat experimenteel te toetsen. ECN verzorgt de uitvoering van dat onderdeel.

Pon Power (in het projectvoorstel nog onder de naam Geveke) heeft jarenlange ervaring als leverancier van aardgas gestookte warmte-kracht installaties met gasmotoren. Pon Power levert ook microgasturbines voor die toepassing. Voor dit project stelt Pon Power een microgasturbine beschikbaar, die door Capstone oorspronkelijk is ontwikkeld voor bedrijf op aardgas en die ook geschikt is voor bedrijf op middencalorisch gas. Capstone heeft daarmee ervaring opgedaan in situaties waar gas beschikbaar is uit afvalstortplaatsen of uit mestvergisting.

De door Capstone voor de 30 kW_e uitvoering opgegeven ondergrens van 12 MJ/Nm³ voor de verbrandingswaarde¹ van gas ligt ruim boven de waarde van ongeveer 6 MJ/Nm³ die via vergassing van biomassa met lucht te realiseren is. Voor de tests moet daarom aardgas bijgemengd worden. Via vergassing met zuurstof of via indirecte vergassing² is gas te produceren met een verbrandingswaarde die wel boven die ondergrens uitkomt. Door FlexEnergy (www.flexenergy.com) is een Capstone microgasturbine aangepast voor gas met een veel lagere verbrandingswaarde. Vanwege de tegenvallende ontwikkeling van de markt voor microgasturbines zal zo'n speciale versie voorlopig niet op de markt komen.

Naast de 30 kW_e microgasturbine leverde Capstone al enige tijd een versie met het dubbele vermogen. Recent is die versie opgewaardeerd tot een vermogen van 65 kW_e. Voor het model dat op stortgas kan worden bedreven geeft Capstone als ondergrens voor de verbrandingswaarde nu 9 MJ/Nm³. Het elektrisch rendement van die uitvoering is met 29% een paar procent hoger dan van de nu geteste uitvoering.

Capstone heeft veel ervaring met projecten waarbij soms wel tientallen kleine turbines worden gecombineerd tot soms meer dan 1 MW_e vermogen. Capstone had ook een 200 kW_e versie in ontwikkeling, maar die ontwikkeling is om commerciële redenen voorlopig stilgelegd. Andere producenten maken microgasturbines in hetzelfde vermogensgebied (80 tot 100 kW_e) of voor meer dan 1 MW_e. Met één van die producenten, OPRA, heeft ECN eerder een haalbaarheidsstudie uitgevoerd, waarbij geen metingen zijn verricht [Rabou, 2001].

Cogen Projects werkt al jaren als adviseur voor potentiële klanten, als promotor van warmte-kracht koppeling (cogeneratie). Samen met VGT (Vereniging Gas Turbines) heeft Cogen Projects een werkgroep opgericht die zich specifiek richt op de inzet van microgasturbines. Pon Power en Cogen Projects hebben samen een goed beeld van de potentiële markt voor warmte-kracht koppeling. HoSt vult dat beeld aan met kennis van de markt voor biomassagestookte installaties. Cogen Projects en HoSt zijn de hoofduitvoerders van de marktstudie, met ondersteuning van Pon Power en ECN.

¹ In dit rapport wordt met verbrandingswaarde steeds de onderste verbrandingswaarde (= Lower Heating Value, LHV) bedoeld. Capstone zelf geeft de bovenste verbrandingswaarde (= Higher Heating Value, HHV).

² Bij indirecte vergassing wordt de productie van warmte, die voor vergassingsreacties nodig is, gescheiden van het eigenlijke vergassingsproces. Voorbeelden zijn de Battelle vergasser, de FICFB (Güssing) vergasser en het door ECN ontwikkelde Milena concept.

2. Experimentele installatie

2.1 Vergasser en gasreiniging

Voor de tests is gebruik gemaakt van de ECN Bivkin vergasser, een 500 kW_{th} circulerend wervelbed (CFB) vergasser. Als brandstof zijn schone houtpellets gebruikt. Het productgas³ is gereinigd met de OLGA en Gasreip installaties. Een beschrijving van de installatie is te vinden in [Boerrigter, 2004]. Voor de huidige tests is een iets gewijzigde configuratie gebruikt.

De vergasser levert productgas dat na reiniging en koeling een verbrandingswaarde heeft van ongeveer 6 MJ/Nm³, dat is 19% van de verbrandingswaarde van Groningen aardgas. Tabel 2.1 geeft de gemiddelde samenstelling van gereinigd productgas en variaties daarin tijdens de uitgevoerde tests. Het vermelde vochtgehalte is niet gemeten maar correspondeert met de dampdruk bij 16°C, de temperatuur van de natte reiniging in Gasreip.

Tabel 2.1 *Gemiddelde samenstelling productgas uit Bivkin vergasser na OLGA en Gasreip gasreiniging.*

Component	Gemiddeld gehalte [vol %]	Minimum gehalte [vol %]	Maximum gehalte [vol %]
CO	16,9	14,9	19,3
H ₂	6,9	6,1	7,3
CH ₄	4,2	3,7	4,5
C ₂ H ₂	0,23	0,17	0,34
C ₂ H ₄	1,7	1,4	1,9
C ₂ H ₆	0,09	0,05	0,13
C ₆ H ₆	0,23	0,21	0,26
C ₇ H ₈	0,017	0,013	0,022
N ₂	52,0	50,4	54,6
CO ₂	15,3	14,3	15,8
H ₂ O *	1,8		
Ar *	0,62	0,61	0,64

* Gehalte H₂O berekend uit temperatuur natte reiniging, gehalte Ar berekend uit gehalte N₂ en verhouding in lucht.

Naast de in Tabel 2.1 genoemde componenten kan productgas verschillende verontreinigingen bevatten. Van de gasvormige componenten zijn NH₃ en H₂S de belangrijkste. Omdat schoon hout is gebruikt als brandstof, zijn de concentraties bij de huidige tests erg laag. Na de gasreiniging bevatte het productgas minder dan 10 ppm NH₃ en 10 tot 15 ppm H₂S. Het gereinigde productgas bevat minder dan 20 mg/Nm³ aan stof⁴ en 50 tot 100 mg/Nm³ aan teerverbindingen, hoofdzakelijk damp van relatief vluchtige verbindingen als (methyl)naftaleen, xyleen en styreen. Zolang het gas boven 0°C blijft bij atmosferische druk, of boven 25°C bij de microgasturbine, is geen condensatie van teer te verwachten.

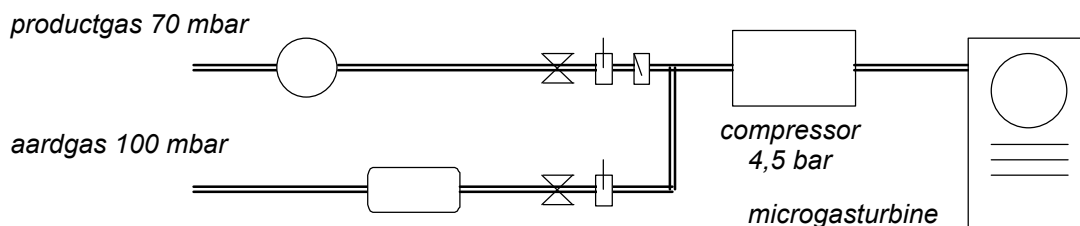
Na de natte reiniging wordt het productgas op lichte overdruk gebracht en verwarmd tot 25°C. In de leiding naar de microgasturbine zal het productgas weer iets afkoelen, maar condensatie van water of teer is niet waarschijnlijk.

³ ECN verkiest de term "productgas" boven de in het projectvoorstel gebruikte term "stookgas" om aan te geven, dat het gas uit een vergasser meer toepassingen heeft dan alleen verbranden.

⁴ Bij één meting tijdens de tests van de microgasturbine is een gehalte van 100 mg/Nm³ gevonden, op een moment dat het elektrostatisch filter problemen vertoonde.

2.2 Infrastructuur gas

De Capstone microgasturbine heeft gas nodig op een druk van ongeveer 4 bar. Omdat productgas en aardgas op ongeveer atmosferische druk beschikbaar zijn, is een compressor nodig. Aardgas en productgas worden vóór de compressor gemengd. Figuur 2.1 geeft de installatie schematisch weer. De onderdelen worden hierna afzonderlijk beschreven.



Figuur 2.1 Schematische weergave van leidingwerk voor productgas en aardgas via compressor naar microgasturbine.

Productgas

Voor productgas is een aansluiting gemaakt op een bestaande leiding voor gereinigd productgas naar een gasmotor. Een turbine gasmeter meet het totale debiet naar gasmotor en microgasturbine. Bepalingen van het rendement zijn uitgevoerd met alleen de microgasturbine in bedrijf. De gasmeter heeft een meetbereik van 13 tot 250 Nm³/uur. De gasdruk bij de meter wordt bepaald door een regelventiel dat is ingesteld op 70 mbar boven de heersende luchtdruk. De temperatuur van het gas is bij de gasmeter gemeten met behulp van een thermokoppel. Het gemeten debiet naar de microgasturbine is steeds gecorrigeerd naar standaard druk en temperatuur.

Aardgas

Voor aardgas is een aftakking gemaakt op het 100 mbar leidingnet in het gebouw. Een standaard gasmeter met een meetbereik van 0,16 tot 25 m³/uur meet het debiet naar de microgasturbine. De temperatuur van het gas is bij de gasmeter gemeten met behulp van een thermokoppel. Het gemeten debiet naar de microgasturbine is steeds gecorrigeerd naar standaard condities.

Menging productgas en aardgas

In de leidingen voor productgas en aardgas zijn handafsluiters gemonteerd waarmee de verhouding productgas:aardgas in te stellen is (zie Figuur 2.2). Omdat de druk in de aardgasleiding hoger is dan in de productgasleiding is in die laatste leiding een terugslagklep geplaatst (zie Figuur 2.3). De microgasturbine wordt altijd gestart op aardgas. Voor bijmengen van productgas wordt eerst de afsluiter in de productgasleiding volledig geopend en daarna de afsluiter in de aardgasleiding geleidelijk dicht gedraaid. In de aardgasleiding is na de afsluiter een drukmeetpunt aangebracht. De terugslagklep opent als de drukval over de bijna gesloten afsluiter in de aardgasleiding zo hoog geworden is, dat op het meetpunt de druk tot ongeveer 65 mbar overdruk is gedaald.

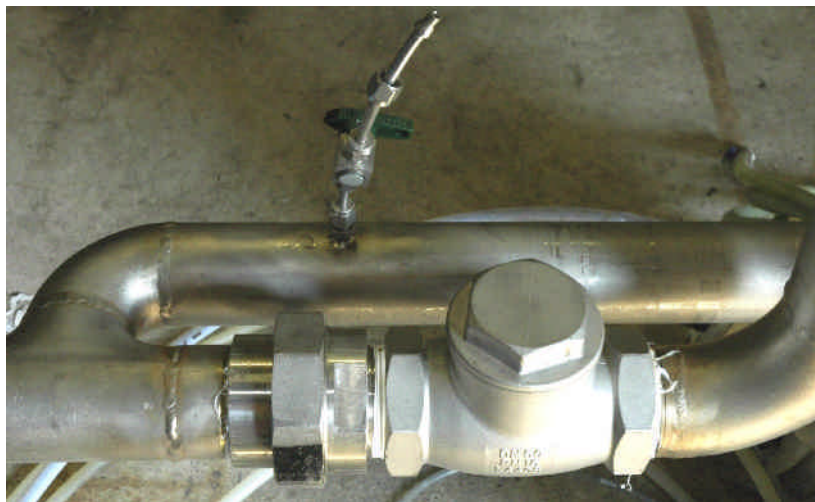
Beveiliging

De microgasturbine en compressor zijn opgesteld in een ruimte waarin voorzieningen zijn getroffen om veilig te kunnen werken met productgas. Bij de opstelling zijn detectoren aangebracht voor de detectie van H₂ en CO, en een noodstopknop om de installatie direct uit te kunnen schakelen (zie Figuur 2.4). Detectie van H₂ of CO duidt op het vrijkomen van productgas, of in het geval van CO op slechte verbranding van aardgas. De gasdetectoren zijn verbonden met een meldpaneel buiten de ruimte. Bij overschrijding van het lage alarmniveau van 20 ppm gaat de alarmlamp in de ruimte aan (zie Figuur 2.4) en een waarschuwingslicht buiten de ruimte. Bij overschrijding van het hoge alarmniveau komt daar een hoorbaar alarmsignaal bij.

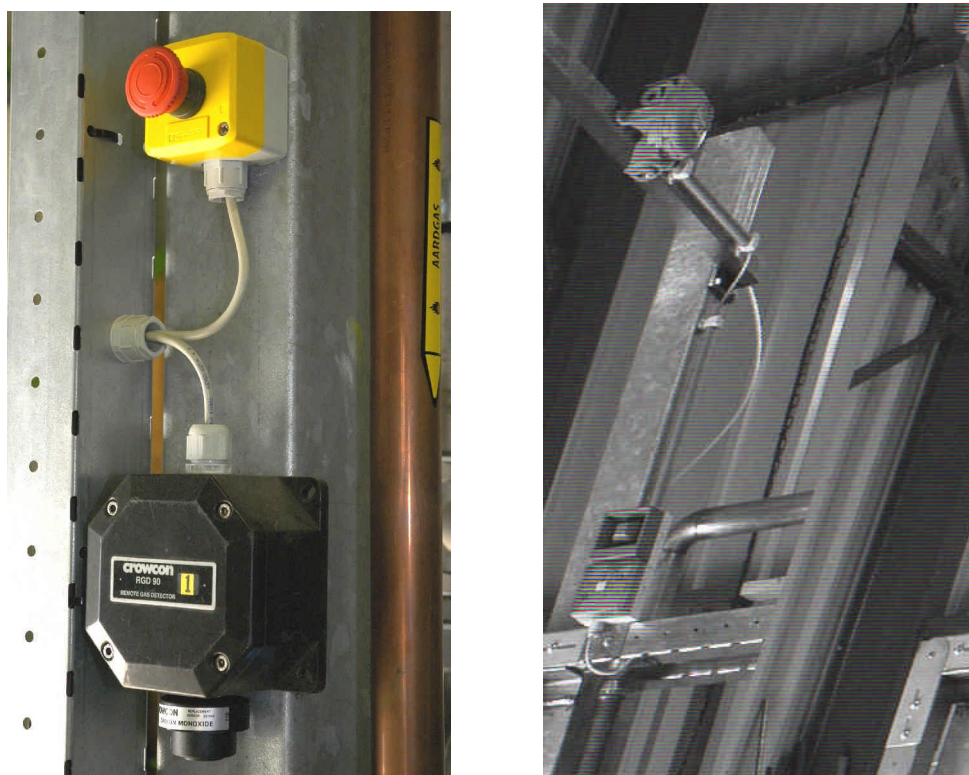
Bij laag alarm schakelt het meldpaneel de spanning af van kleppen die de veiligheidssleppen in de gasleidingen (zie Figuur 2.2) van perslucht voorzien. Ook als de netspanning wegvalt, vallen de persluchtkleppen dicht en sluiten de veiligheidssleppen in de gasleidingen automatisch. Het alarmniveau is zo laag gesteld, dat er een waarschuwing uitgaat op een niveau ruim onder de voor mensen gevaarlijke CO-concentratie. De explosiegrens ligt zoveel hoger, dat afsluiten van de gastoevoer bij laag alarm ook de kans op explosies klein maakt. De H₂-detector dient niet als beveiliging tegen voor mensen gevaarlijke concentraties, maar als extra controle op het vrijkomen van productgas.



Figuur 2.2 *Handafsluiters in leidingen voor aardgas (links) en productgas (rechts). Na de handafsluiters zijn veiligheidssleppen gemonteerd, die sluiten bij gasalarm.*



Figuur 2.3 *Terugslagklep in productgasleiding voor aansluiting op aardgasleiding. Boven de terugslagklep is het aansluitpunt voor drukmeting in de aardgasleiding te zien.*



Figuur 2.4 *Detector voor CO (links onder), noodstopknop (linksboven), detector voor H₂ (rechtsboven) en meldlicht gasalarm (rechtsonder) bij opstelling microgasturbine.*



Figuur 2.5 *Compressor om aardgas en productgas op druk te brengen voor microgasturbine.*

Compressor

Figuur 2.5 toont de CompAir compressor waarmee aardgas en productgas op de benodigde druk van 4,5 bar zijn gebracht. De compressor heeft een capaciteit van 75 Nm³/uur bij een werkdruk van 5,5 bar. De gebruikte uitvoering heeft een 7,5 kW motor, maar is voor de test in feite veel te groot. Het opgenomen vermogen bij continu gebruik in deellast is niet gemeten. De compressor zuigt gas aan via een 2" leiding en levert gas af via een 3/4" leiding. Bij de microgasturbine is een stuk flexibele leiding gebruikt (zie Figuur 2.6) om trillingen op te vangen.



Figuur 2.6 *Flexibele aansluiting gasleiding op microgasturbine.*



Figuur 2.7 *Capstone microgasturbine voor test met aardgas en productgas.*

2.3 Microgasturbine

Voor de test is gebruik gemaakt van een Capstone microgasturbine met een nominaal vermogen van 30 kW_e (zie Figuur 2.7). Het apparaat is opgesteld in een onverwarmde ruimte. Tijdens de tests zijn twee buitendeuren geopend om verse lucht toe te laten. De temperatuur in de ruimte was ongeveer 10°C en de luchtdruk 1000 mbar.

Voor het starten van de microgasturbine hoeft de gebruiker alleen de startknop in te drukken en het gewenste vermogen in te stellen. De ingebouwde regelunit zorgt dan voor koppeling aan het elektriciteitsnet en zoekt het juiste werkpunt. Belangrijke parameters zijn daarbij het toerental,

de turbine inlaat temperatuur en de stand van de gasklep. Afhankelijk van het vermogen schakelt het systeem tussen twee verbrandingsmodes, waardoor met name bij hoog vermogen schadelijke emissies extreem laag zijn.

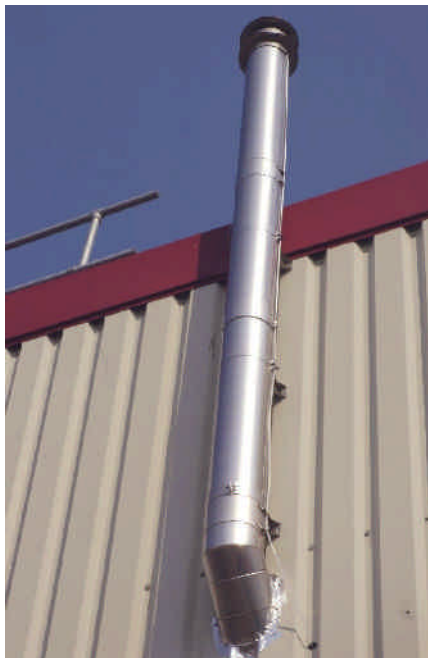


Figuur 2.8 Instellen vermogen microgasturbine via bedieningspaneel.

De software instellingen voor de aansturing van de gasklep zijn aangepast om bedrijf op gas met een lage verbrandingswaarde mogelijk te maken. Omdat de handmatige instelling van de mengverhouding aardgas:productgas geen snelle verandering in de brandstofvraag kan volgen, is er voor gekozen de microgasturbine gewoon op aardgas te starten. Bij de tests is het bedieningspaneel boven de luchtinlaat gebruikt om het vermogen in te stellen (zie Figuur 2.8) en enkele belangrijke parameters uit te lezen (zie Figuur 2.9).



Figuur 2.9 Uitlezing geleverd vermogen (boven), turbine inlaat temperatuur en toerental (midden) en stand gasklep (onder) via bedieningspaneel microgasturbine.



Figuur 2.10 *Rookgasafvoer microgasturbine. Rechts van de afvoer buiten en linksboven bij de afvoer binnen is de flexibele leiding te zien voor het bemonsteren van rookgas.*

Rookgasafvoer

Rookgassen uit de Capstone microgasturbine hebben een temperatuur van ongeveer 300°C waaruit nuttige warmte kan worden gewonnen. Bij de test is dat niet gebeurd. De rookgassen zijn naar buiten afgevoerd via een dubbelwandige geïsoleerde schoorsteen (zie Figuur 2.10). Via een metalen buis in het einde van de schoorsteen en een kunststof leiding wordt continu rookgas aangezogen naar de rookgasanalyse. Het rookgas wordt eerst gedroogd en dan geanalyseerd op gehalte O₂, CO, CO₂, onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y), NO, NO₂ en totaal NO_x.

3. Experimentele resultaten

De meeste tests zijn uitgevoerd binnen een periode van twee weken. Tabel 2.1 laat zien, dat over zo'n periode de concentraties van de belangrijkste brandbare componenten ongeveer 10% kunnen afwijken van de gemiddelde waarden. Dit hangt samen met de bedrijfscondities van de installatie. Na een opstartprocedure is extra warmteproductie nodig om de vergasser helemaal door te warmen⁵. De concentraties aan brandbare componenten zijn dan lager. Een deel van de variaties is het gevolg van verschillen in vochtgehalte van diverse partijen brandstof. Deze variaties in samenstelling van het gas zijn relatief traag en kunnen worden opgevangen door aanpassen van de mengverhouding van aardgas en productgas.

Er kunnen ook snelle variaties optreden, omdat het voeden van een vaste brandstof nooit helemaal constant verloopt, zeker niet op kleine schaal. Door de korte verblijftijd van de brandstof in het gebruikte type vergasser, resulteren variaties in de toevoer van brandstof in schommelingen van de verhouding lucht:brandstof. Die schommelingen werken direct door in de concentraties van brandbare componenten in productgas. Tijdens een deel van de tests veroorzaakten oscillaties in de luchttoevoer naar de vergasser extra schommelingen. De regeling van de microgasturbine moet deze variaties in de verbrandingswaarde van het gas opvangen.

Een deel van de metingen is gehinderd door een haperende gasmeter voor productgas. De oorzaak van die haperingen is niet achterhaald. Waarschijnlijk speelt een rol, dat het debiet van productgas rond de ondergrens van het meetbereik lag. In voorkomende gevallen is het debiet aan productgas berekend uit de samenstelling van de rookgassen. De resultaten komen goed overeen met die van metingen waarbij de gasmeter correct lijkt te functioneren.

3.1 Vermogen

Voor het ontwerpvermogen van 30 kW_e is ongeveer 13 Nm³/uur aardgas nodig. Bij gas met een lagere verbrandingswaarde is een groter debiet nodig. Uit de metingen blijkt, dat de gasklep maximaal 25 Nm³/uur kan doorlaten. Dit betekent, dat de microgasturbine het ontwerpvermogen kan leveren, als de verbrandingswaarde van het gas tenminste 16 MJ/Nm³ bedraagt⁶. Bij productgas met een verbrandingswaarde van 6 MJ/Nm³ moet per m³ daarvoor 0,6 m³ aardgas bijgemengd worden. Op energiebasis levert productgas dan maar een bijdrage van 25%.

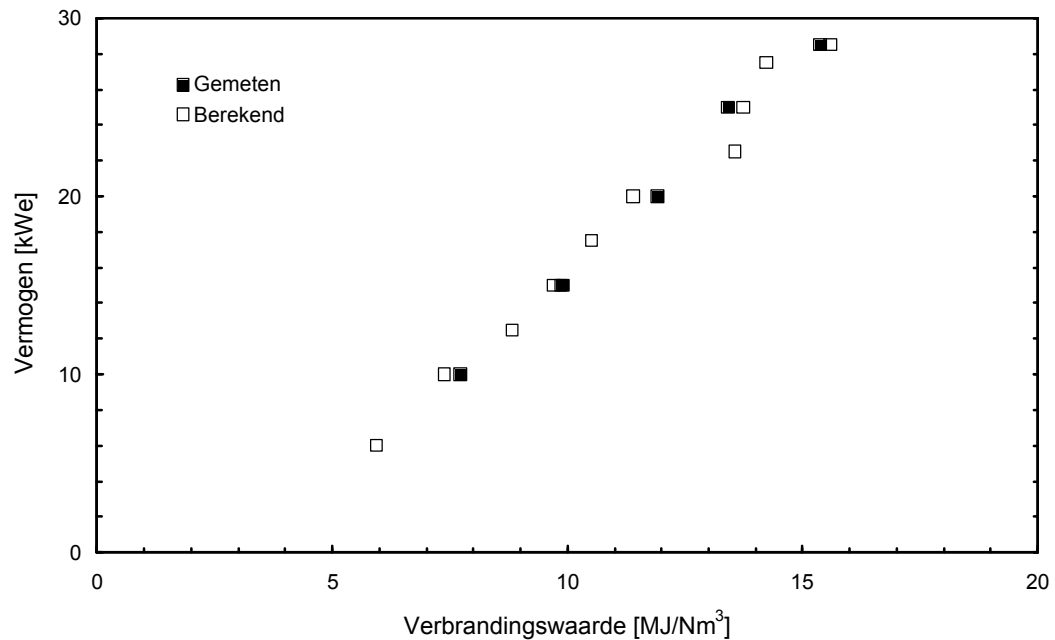
Uit de testresultaten blijkt, dat de microgasturbine ook werkt bij een grotere bijdrage van productgas, dat wil zeggen, bij een lagere verbrandingswaarde. Omdat er dan niet genoeg gas kan worden toegevoerd, haalt de microgasturbine niet het ontwerpvermogen (zie Figuur 3.1). Zelfs bedrijf op puur productgas blijkt mogelijk, maar het vermogen valt terug tot 20% van de ontwerpwaarde. De verbranding is dan overigens niet stabiel genoeg voor langdurig bedrijf (zie paragraaf 3.4). Figuur 3.2 toont het aandeel dat productgas kan leveren als functie van het vermogen.

⁵ De wand van de vergassingsreactor bestaat uit een halve meter beton en isolatiemateriaal. De reactor wordt opgewarmd tot de bedrijfstemperatuur door het verbranden van biomassa. Na een koude start wordt de reactor ongeveer 6 uur op de bedrijfstemperatuur gehouden, voordat wordt overgeschakeld naar vergassing. Na een onderbreking van het vergassingsproces is deze periode korter.

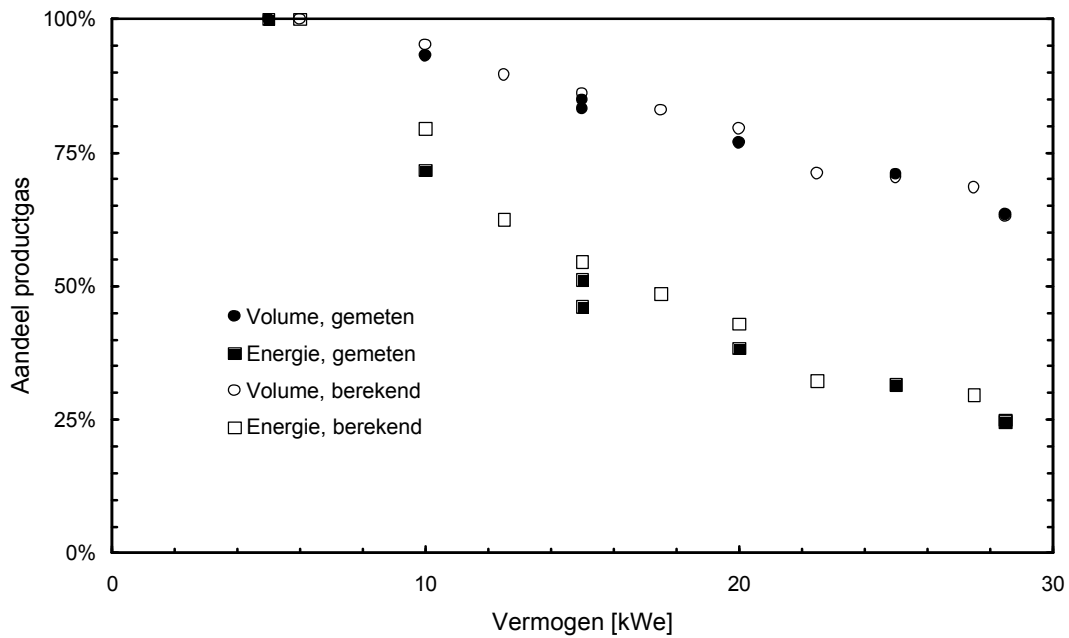
⁶ De regeling van de microgasturbine brengt het geleverde vermogen een fractie onder het gevraagde vermogen. Bij aardgas is het verschil verwaarloosbaar, voor menggas van 16 MJ/Nm³ is bij 30 kW het verschil 1,5 kW.

3.2 Rendement

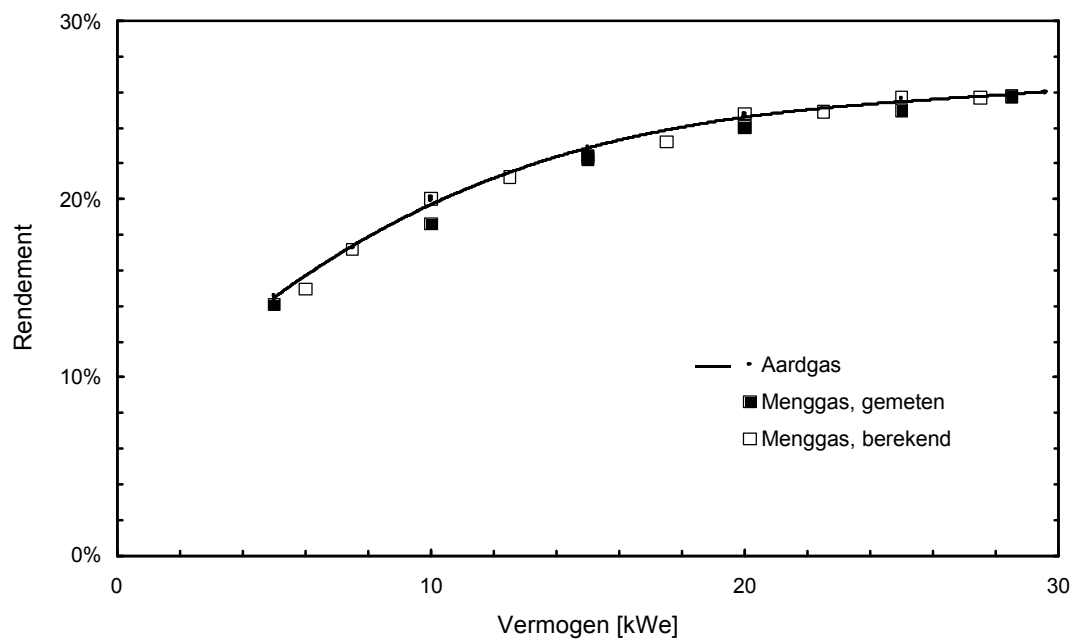
Figuur 3.3 toont het rendement als functie van het vermogen voor bedrijf op aardgas en menggas (verschillende mengsels van aardgas en productgas, vergelijk Figuur 3.2). Aan deze resultaten mag geen absolute waarde worden toegekend, omdat niet is gewerkt met geijkte apparatuur en niet onder standaard condities. Resultaten voor menggas wijken niet significant af van die voor aardgas. Het benodigde vermogen voor de compressor is niet in rekening gebracht. Omdat het gasdebiet voor menggas het dubbele is van dat voor aardgas, zal de compressor voor menggas meer energie verbruiken. Het netto rendement zal daardoor bij menggas iets lager uitvallen dan bij aardgas.



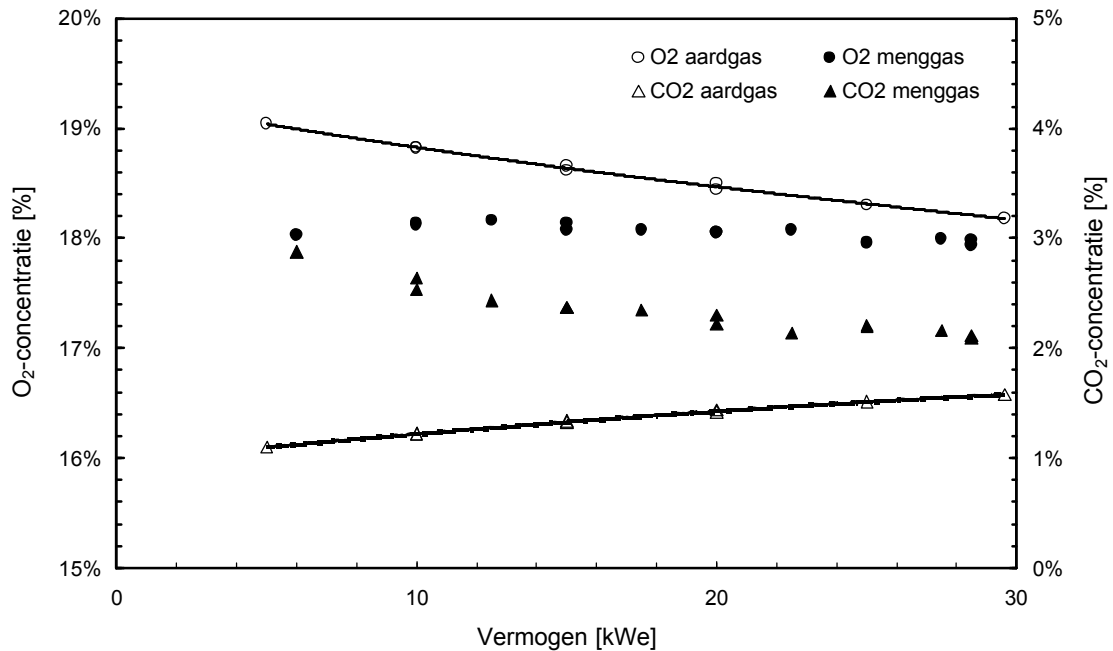
Figuur 3.1 *Maximum vermogen als functie van de verbrandingswaarde van een mengsel van aardgas en productgas. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen. Boven 16 MJ/Nm³ gaat het maximum vermogen naar de ontwerpwaarde van 30 kW_e.*



Figuur 3.2 *Maximum bijdrage van productgas op basis van volume of energie als functie van het vermogen. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen.*



Figuur 3.3 *Rendement microgasturbine bij bedrijf op aardgas of op een mengsel van aardgas en productgas. Voor berekende waarden is het productgasdebiet berekend uit de samenstelling van de uitlaatgassen.*



Figuur 3.4 Concentraties O_2 en CO_2 in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of op een mengsel van aardgas en productgas.

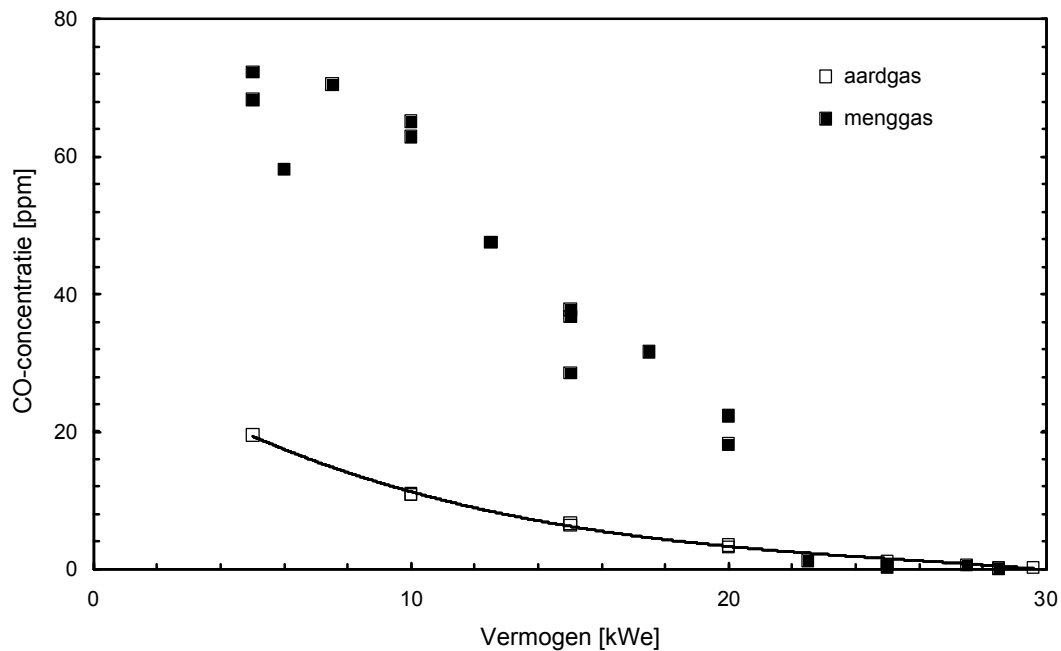
3.3 Emissies

De microgasturbine werkt met een hoge overmaat lucht. Bij bedrijf op aardgas varieert het O_2 -gehalte in de uitlaatgassen⁷ van ongeveer 19% bij 5 kW_e tot 18% bij 30 kW_e. Het CO_2 -gehalte stijgt daarbij van 1,1% tot 1,6%. Bij bedrijf op een mengsel van aardgas en productgas bevatten de uitlaatgassen minder O_2 en meer CO_2 . Figuur 3.4 toont de resultaten. Bij hoog vermogen lopen de resultaten voor menggas naar die van aardgas, zoals te verwachten bij een met het vermogen toenemend aandeel aardgas in menggas (zie Figuur 3.2). Ten opzichte van bedrijf op aardgas levert bedrijf op puur productgas (bij 6 kW_e) ruim een verdubbeling van het CO_2 -gehalte.

Zoals gemeld in de inleiding, zouden vergassing met zuurstof of indirecte vergassing productgas leveren met voldoende hoge verbrandingswaarde om de microgasturbine ook bij vollast op puur productgas te kunnen bedrijven. Bij een indirecte vergasser zou overigens het CO_2 -gehalte maar met ongeveer 60% toenemen ten opzichte van bedrijf op aardgas. De rest van de CO_2 komt dan vrij in de uitlaatgassen van de verbrandingsreactor.

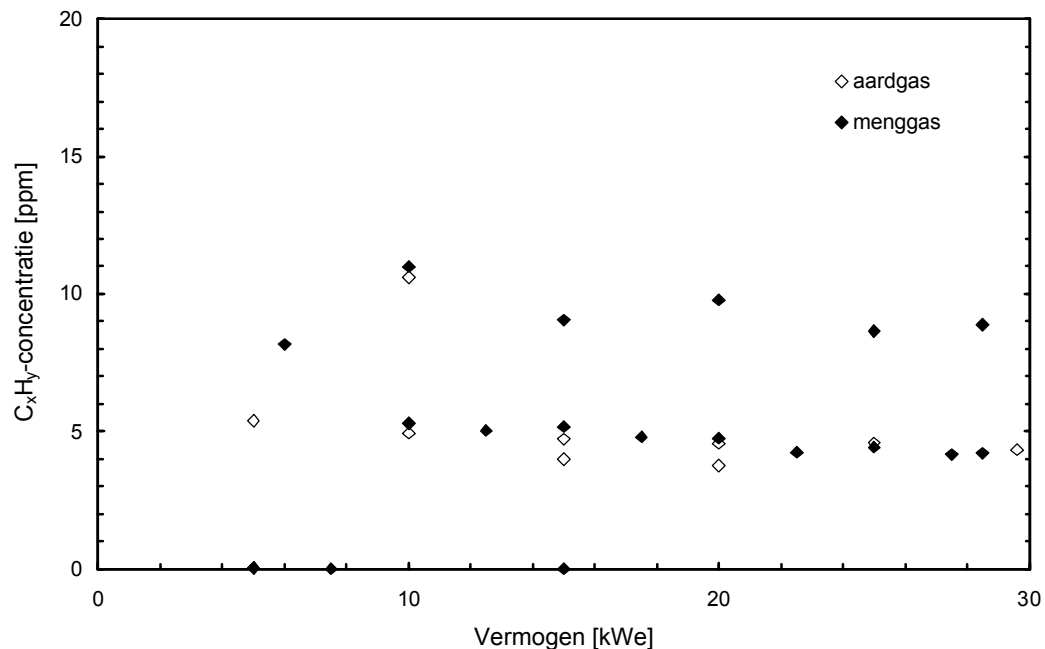
Figuur 3.5 tot en met Figuur 3.8 tonen de gemeten concentraties aan CO , C_xH_y , NO en NO_2 in de uitlaatgassen. Boven 20 kW_e heeft het toevoegen van productgas geen effect. Onder 20 kW_e levert productgas hogere CO -emissie en lagere NO -emissie. De omslag bij 20 kW_e is gekoppeld aan het schakelen tussen twee verbrandingsmodes als vermeld in paragraaf 2.3. Het effect daarvan is ook duidelijk te zien aan het verloop van de NO - en NO_2 -emissies, die voor aardgas en menggas boven 20 kW_e met een sprong dalen. Een zelfde sprong is in de CO -emissie alleen te zien bij bedrijf op menggas. Voor de C_xH_y -emissie lijkt de verbrandingsmode niet uit te maken.

⁷ Voor analyse wordt eerst water uit de uitlaatgassen gecondenseerd. Alle hier gepresenteerde resultaten hebben daarom betrekking op droog gas.

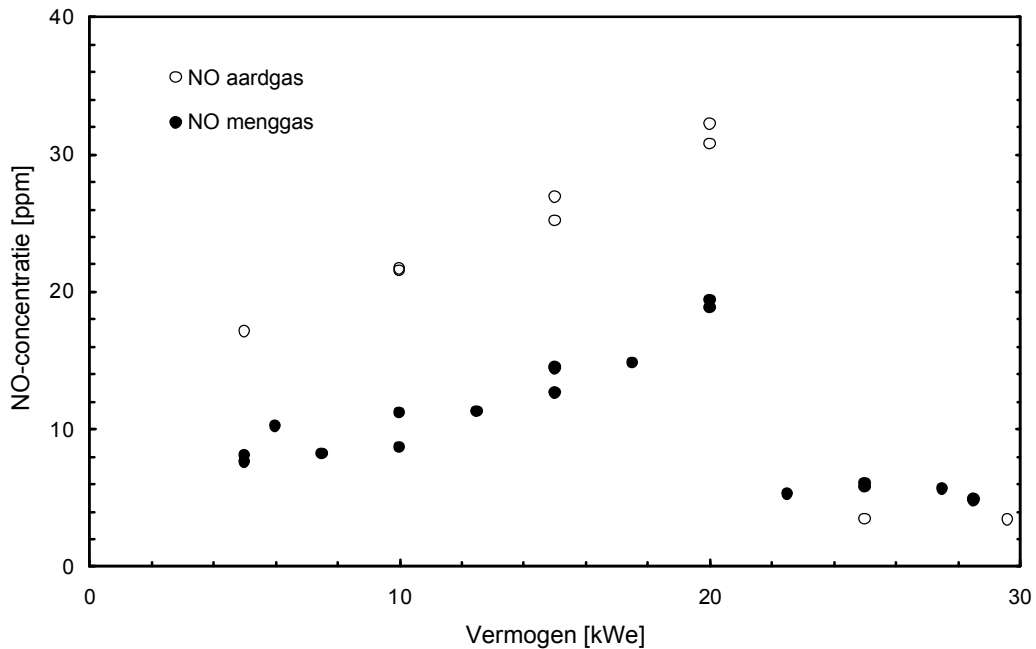


Figuur 3.5 Concentratie CO in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of een mengsel van aardgas en productgas.

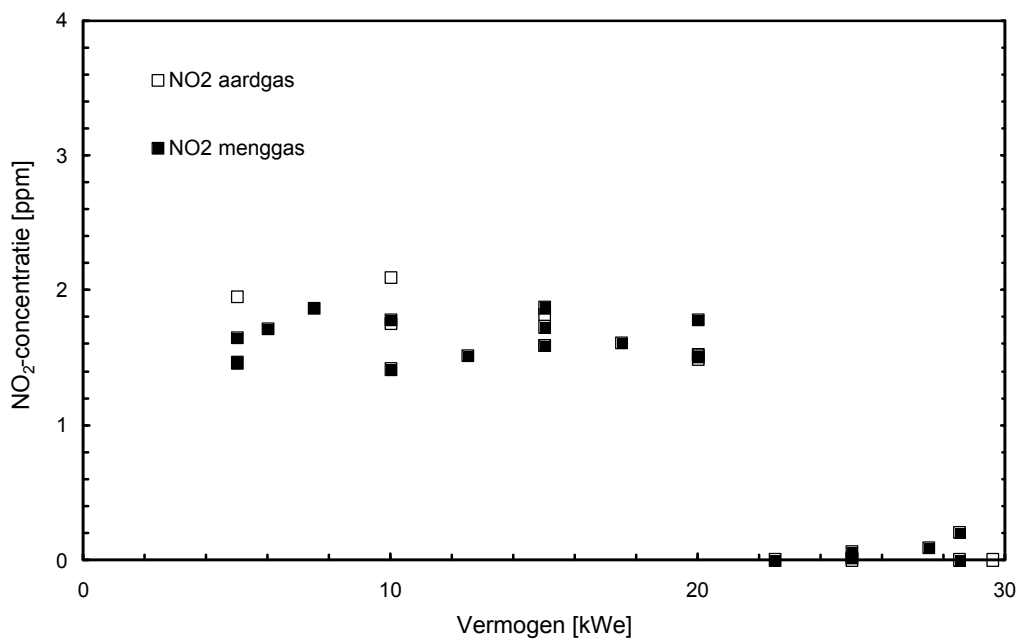
Bij vergelijking van de gemeten emissies met die bij een gasmotor moet er rekening mee worden gehouden, dat bij de microgasturbine de resultaten geflatteerd worden door de verdunning met lucht. Correctie naar de voor gasmotoren gebruikelijke 6% O_2 in de uitlaatgassen levert een factor 5 hogere waarden. Ook dan blijven voor CO, C_xH_y , NO en NO_2 de concentraties bij vermogens boven 20 kW_e beneden 25 ppm. In dit opzicht presteert de Capstone microgasturbine veel beter dan een gasmotor zonder nabehandeling van de uitlaatgassen.



Figuur 3.6 Concentratie onverbrande koolwaterstoffen in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas.



Figuur 3.7 Concentratie NO in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas. De sprong bij 20 kW_e is het gevolg van schakelen tussen twee verbrandingsmodes.



Figuur 3.8 Concentratie NO_2 in uitlaatgassen als functie van vermogen bij bedrijf op aardgas of mengsel van aardgas en productgas. De sprong bij 20 kW_e is het gevolg van schakelen tussen twee verbrandingsmodes.

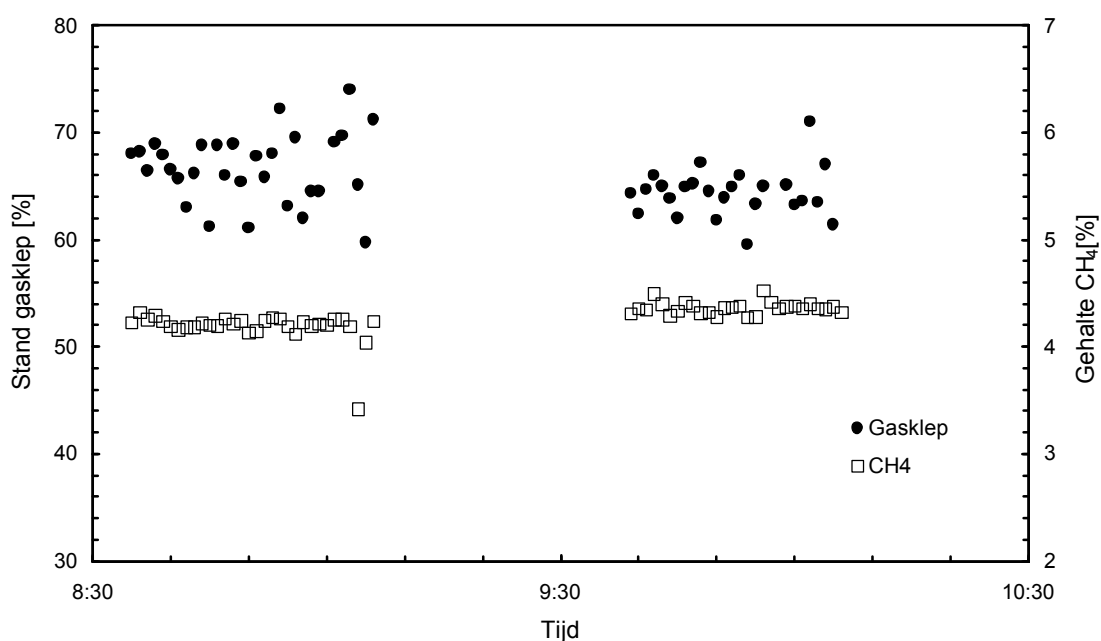
3.4 Stabiliteit

Bij de hiervoor gerapporteerde resultaten is zoveel mogelijk geprobeerd het aandeel productgas zo groot mogelijk te houden. Omdat de verbrandingswaarde van het productgas kan variëren, is voor langdurig bedrijf een regeling nodig die ter compensatie het aandeel aardgas of het vermogen kan aanpassen. De huidige installatie was daar niet van voorzien. Om toch het gedrag

over langere perioden te kunnen volgen, is het aandeel productgas bij metingen op menggas iets lager ingesteld. Voor bedrijf op puur productgas is het vermogen lager ingesteld. Beide maatregelen geven het regelsysteem van de microgasturbine meer speelruimte.

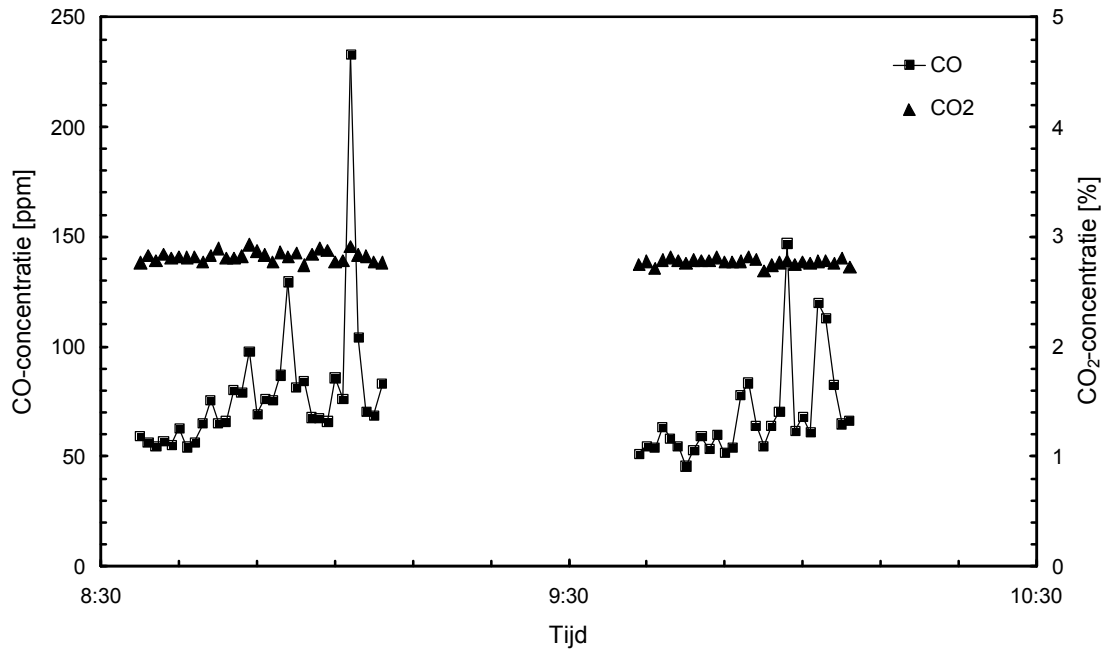
Figuur 3.9 laat zien hoe de regeling van de microgasturbine de gasklep regelt bij een vermogen van 5 kW_e gedurende twee perioden van een half uur. Ter vergelijking is ook de variatie in het CH₄-gehalte in productgas gegeven, als maat voor de variatie in kwaliteit daarvan. Bij stand 80 is de gasklep volledig geopend. Gedurende het eerste half uur staat de gasklep gemiddeld iets verder open dan tijdens de tweede periode. Daarmee reageert de regeling op de kwaliteit van het productgas. Variaties in de stand van de gasklep zijn in de eerste periode ook groter. Dat kan het gevolg zijn van parallel bedrijf van de microgasturbine en een gasmotor⁸.

Beide pogingen tot langdurig bedrijf op puur productgas bij 5 kW_e zijn afgebroken omdat de verbranding toch niet stabiel bleek. Ook een hier niet getoonde poging met beter productgas bij 6 kW_e is om die reden na drie kwartier afgebroken. In alle gevallen lijken er in het begin geen problemen, maar zijn er na verloop van tijd ploffen hoorbaar, zoals bij een koude start. Ook de gemeten CO-emissie laat zien, dat de instabiliteit lijkt toe te nemen bij langduriger bedrijf (zie Figuur 3.10). In theorie is het mogelijk, dat de vlam terugslaat, maar dat is niet waarschijnlijk, omdat het productgas maar 7% H₂ bevat. Het ligt meer voor de hand, dat de vlam eerst afblaast en dan alsnog ontsteekt. Als de vlam echt uitblaast en de microgasturbine stopt, komt er in de ruimte CO vrij. Het lijkt erop, dat onverbrand productgas via de luchtinlaat weglekt.



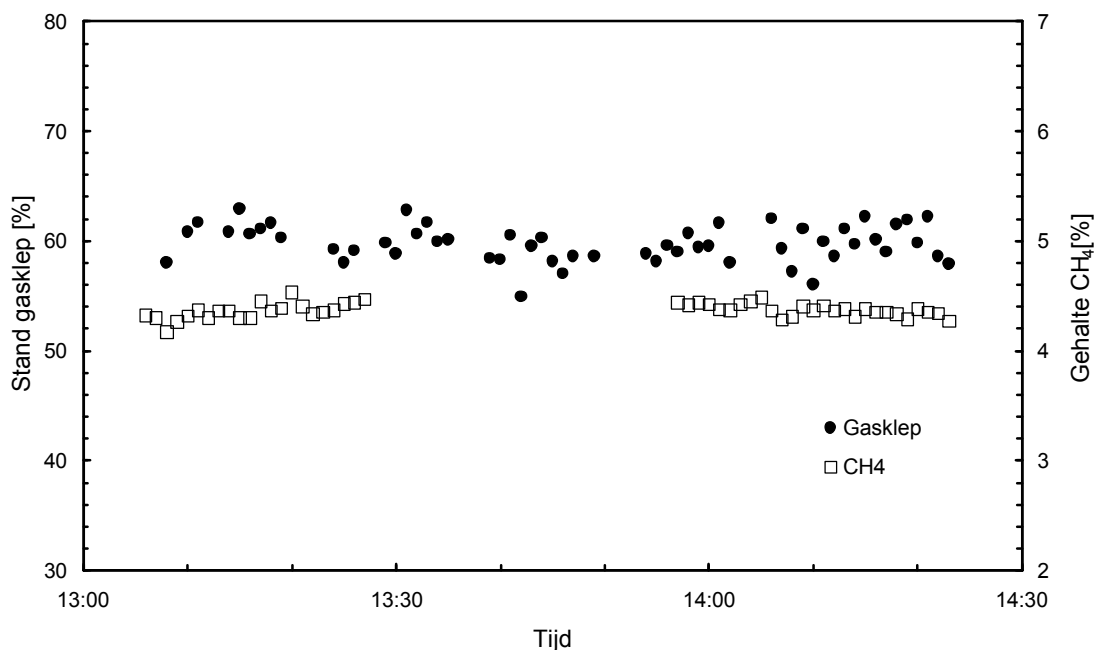
Figuur 3.9 *Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 5 kW_e op productgas.*

⁸ De gasmotor vraagt ongeveer vier keer zoveel productgas als de microgasturbine. Als de regeling van de gasmotor, in reactie op variaties in de kwaliteit van het productgas, meer of minder gas vraagt, verandert de druk in de leiding. Dat heeft invloed op de mengverhouding aardgas:productgas bij de microgasturbine, waarop de stand van de gasklep reageert.

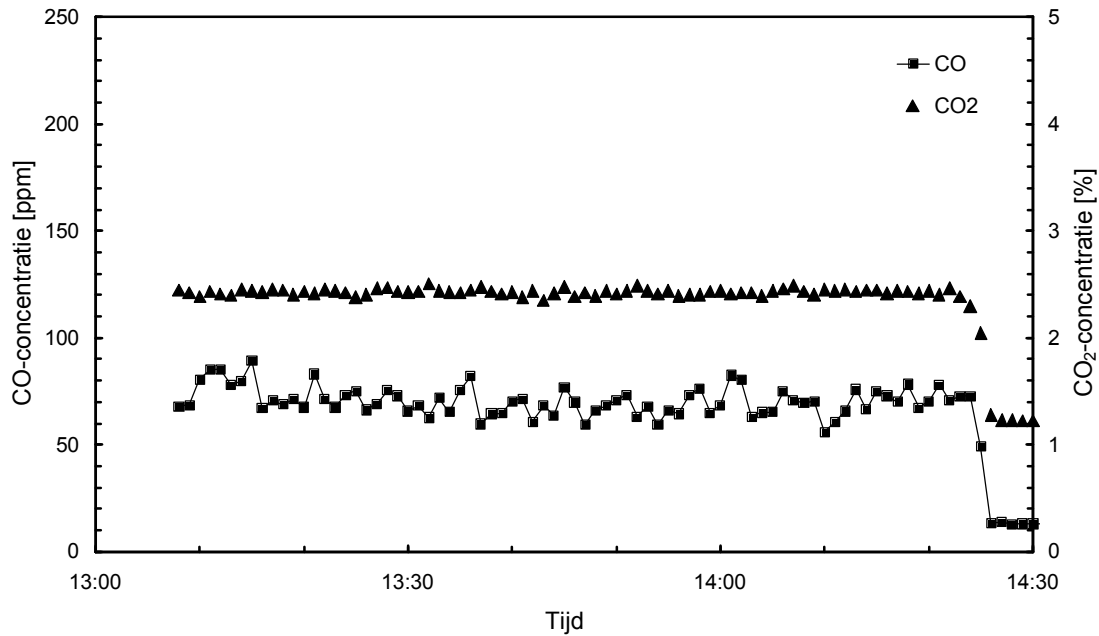


Figuur 3.10 Concentraties CO_2 en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 5 kW_e op productgas.

Omdat langdurig bedrijf op puur productgas niet mogelijk bleek, zijn verdere tests uitgevoerd met menggas. Figuur 3.11 en Figuur 3.12 tonen het resultaat van bedrijf op $7,5 \text{ kW}_e$. Op energiebasis is het aandeel van productgas 72% (op basis van volume 93%), wat resulteert in menggas met een verbrandingswaarde van $8,1 \text{ MJ/Nm}^3$. De stand van de gasklep vertoont soortgelijke schommelingen als bij de tweede periode op puur productgas, maar de CO -emissie toont geen uitschieters meer die duiden op afblazen van de vlam. Aan het einde van de test is overgeschakeld op aardgas, waardoor de CO_2 - en CO -concentraties dalen (in overeenstemming met de resultaten in Figuur 3.4 en Figuur 3.5).

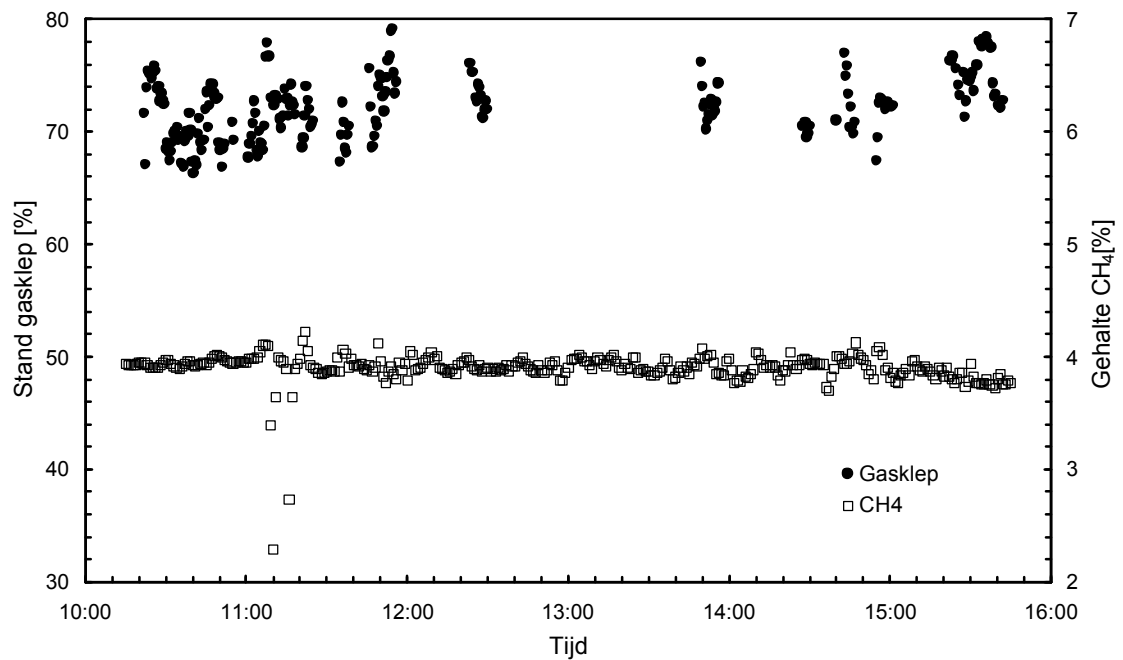


Figuur 3.11 Stand gasklep en gehalte CH_4 in productgas tijdens bedrijf bij $7,5 \text{ kW}_e$ op menggas met 72% bijdrage (op energiebasis) van productgas.

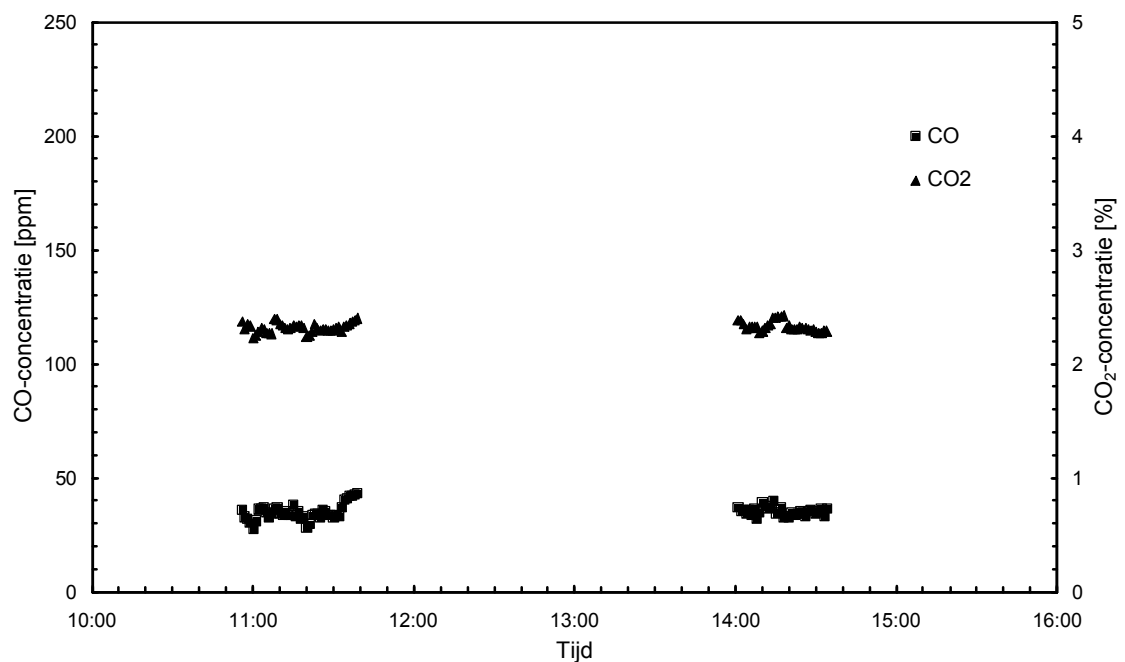


Figuur 3.12 Concentraties CO_2 en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij $7,5\text{ kW}_e$ op menggas met 72% bijdrage (op energiebasis) van productgas. Tijdens laatste 5 minuten bedrijf op aardgas.

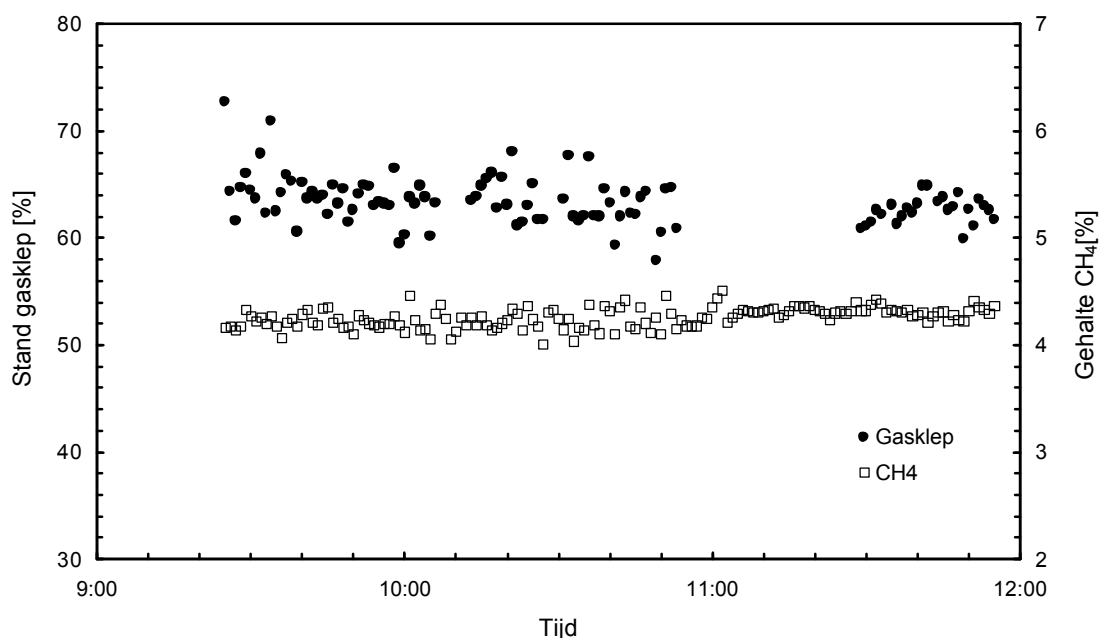
Figuur 3.13 tot en met Figuur 3.16 tonen resultaten van langere perioden bedrijf bij 15 kW_e . De bijdrage van productgas was op basis van energie 46% (op basis van volume 83%) tijdens de langste periode en 43% (respectievelijk 80%) tijdens de kortere periode. De stand van de gasklep is niet continu geregistreerd, maar de beschikbare gegevens tonen dezelfde variatie als bij een groter aandeel productgas. Het CH_4 -gehalte van het productgas was tijdens de langere periode duidelijk lager dan tijdens de kortere periode. Als gevolg daarvan is de verbrandingswaarde van het menggas ook lager, namelijk $9,9\text{ MJ/Nm}^3$ tegen $11,3\text{ MJ/Nm}^3$. De uitschieters in het CH_4 -gehalte naar beneden zijn het gevolg van inlek van lucht bij het nemen van een gasmonster. De CO -emissie is duidelijk lager en lijkt iets stabielere dan bij $7,5\text{ kW}_e$. Dit duidt erop, dat de verbranding vollediger en stabielere is dankzij de hogere verbrandingswaarde. Omdat tijdens de langere periode de analyse van uitlaatgassen maar beperkt beschikbaar was, is het niet goed mogelijk een vergelijking te maken tussen de twee perioden van bedrijf op 15 kW_e . Maar de gemiddelde waarden voor de CO -concentratie van 35 ppm respectievelijk 29 ppm bevestigen de trend, dat een hogere verbrandingswaarde meer volledige verbranding bevordert. Hierbij moet wel worden aangetekend, dat er geen langdurige tests zijn uitgevoerd in de verbrandingsmode die boven 20 kW_e zorgt voor extreem lage emissies (zie Figuur 3.5 tot en met Figuur 3.8).



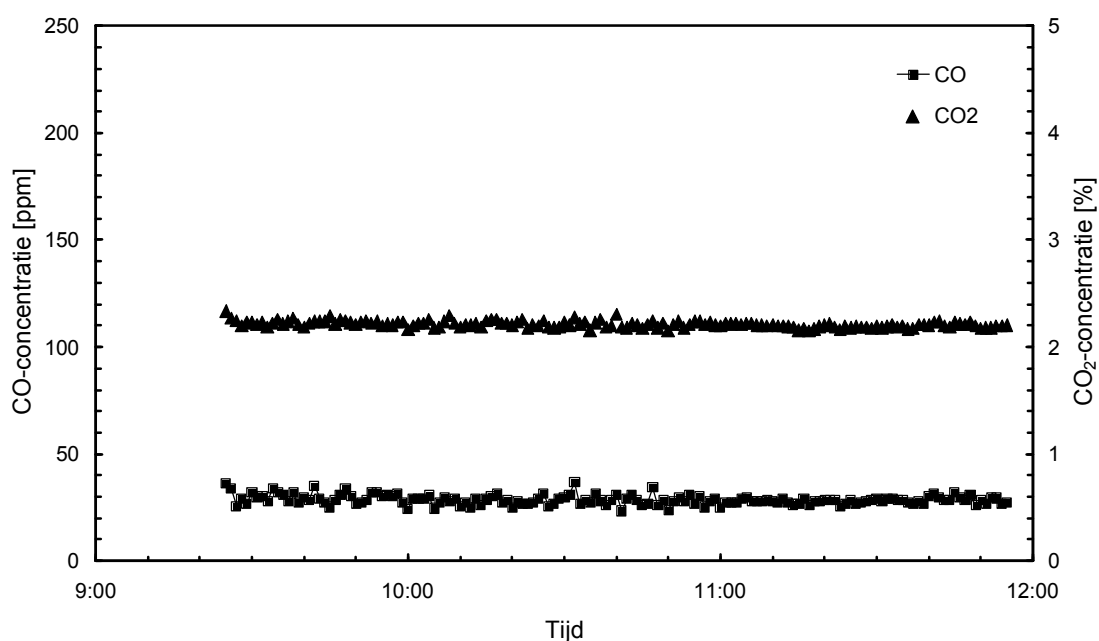
Figuur 3.13 *Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 46% bijdrage (op energiebasis) van productgas.*



Figuur 3.14 *Gehalte CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 46% bijdrage (op energiebasis) van productgas.*



Figuur 3.15 *Stand gasklep en gehalte CH₄ in productgas tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 43% bijdrage (op energiebasis) van productgas.*



Figuur 3.16 *Gehalte CO₂ en CO in uitlaatgassen tijdens bedrijf bij 15 kW_e op menggas met 43% bijdrage (op energiebasis) van productgas.*

3.5 Vervuiling

Na afloop van de tests is een inspectie uitgevoerd van de onderdelen die met productgas in aanraking zijn geweest. De brander was vervuild met een geelachtig poeder, dat overigens eenvoudig weg te vegen was. Op dit poeder is geen verdere analyse uitgevoerd, maar het vermoeden bestaat dat het om zwavel gaat. In de verbrandingskamer is een zelfde aanslag te zien, maar alleen op de plaats waar de brander op gericht staat. De rest van de verbrandings-

kamer en de inlaat van de turbine waren schoon. Afgezien van deze aanslag zijn geen schade of andere gevolgen van de test geconstateerd.

Uit deze inspectie is geconcludeerd, dat bij eventueel langer gebruik de nu geconstateerde vervuiling toch problemen zou kunnen veroorzaken. Bij een eventueel vervolg zal daar aandacht aan moeten worden besteed. Als de aanwezigheid van een kleine hoeveelheid H_2S in het productgas de oorzaak is, zou het gebruik van de voor zogenaamd "zuur gas" aangepaste versie van de Capstone microgasturbine een simpele oplossing bieden.

4. Marktstudie

De marktstudie is uitgevoerd door Cogen Projects en HoSt. Bijlage A bevat het volledige verslag. Hier volgt een korte samenvatting.

Uitgangspunten

Uit de in het vorige hoofdstuk gerapporteerde resultaten blijkt, dat de Capstone microgasturbine weliswaar kan werken op productgas uit een met lucht werkende circulerend wervelbed vergasser, maar dat het vermogen dan beperkt blijft tot 20% van de ontwerpwaarde. Om het ontwerpvermogen te kunnen leveren moet de verbrandingswaarde minstens 15 MJ/Nm³ zijn. Dit is te realiseren door aardgas bij te mengen, maar dan blijft de bijdrage van productgas beperkt tot hoogstens 25%. Een aantrekkelijker optie is het gebruik van een zogenaamde indirecte vergasser. Daarin zijn de eigenlijke vergassingsreacties gescheiden van de verbrandingsreacties die de benodigde warmte leveren. Dergelijke vergassers bestaan in verschillende uitvoeringen: het Battelle-concept in de Verenigde Staten, het FICFB-concept in Güssing en het Milena-concept dat door ECN is ontwikkeld. Voor de marktstudie is ervan uitgegaan, dat een indirecte vergasser wordt ingezet, zodat bijmengen van aardgas niet nodig is.

Bij alle toepassingen moet de microgasturbine concurreren met de gasmotor. Ten opzichte daarvan heeft de microgasturbine een lager elektrisch rendement, ongeveer hetzelfde thermisch rendement en veel lagere schadelijke emissies. Het relatief lage vermogen van microgasturbines maakt het nodig meerdere exemplaren te koppelen aan één vergasser. Dat maakt het mogelijk productgas in plaats van warmte te transporteren naar verschillende locaties waar warmte nodig is. Dat verruimt de toepassingsmogelijkheden, omdat de kosten van gasdistributie lager zijn dan die van warmtedistributie.

Potentiële toepassingen

Microgasturbines zullen het eerst ingezet worden op plaatsen waar gedurende een groot aantal uren per jaar warmte op relatief laag temperatuurniveau nodig is. Te denken valt aan het maken van warm tapwater, ruimteverwarming in het winterseizoen in combinatie met absorptiekoeling in de zomer, verwarming van zwembadwater, verwarming van procesbaden in de industrie, gebruik van warme uitlaatgassen als verbrandingslucht in een nageschakelde afgassenketel, of verwarming van kassen in combinatie met benutting van CO₂ in de uitlaatgassen om de productiviteit van gewassen te verhogen.

Uit een nadere analyse volgt, dat de utiliteitssector en de tuinbouwsector de beste kansen bieden. Vanwege het beperkte potentieel in de utiliteitssector is de rest van de studie alleen uitgevoerd voor de tuinbouw, waar extra inkomsten uit CO₂-bemesting de toepassing van microgasturbines achter een biomassa vergasser eerder aantrekkelijk kunnen maken.

Vanwege de hoge warmte/krachtverhouding ligt toepassing niet voor de hand bij bedrijven die de geproduceerde elektriciteit zelf gebruiken voor belichting om de groei van gewassen te bevorderen. Er is daarom aangenomen dat alle geproduceerde elektriciteit wordt geleverd aan het openbare elektriciteitsnet. Anders dan bij het gebruik van aardgas, is bij de combinatie met biomassa vergassing levering van elektriciteit ook tijdens daluren aantrekkelijk vanwege de hoge MEP subsidie.

Beoordelingsmethode

De kosten en baten van een standaard systeem met cv-ketel voor verwarming en CO₂-bemesting zijn vergeleken met systemen waarin een groot deel van de warmte en de CO₂-bemesting worden geleverd door een gasmotor op aardgas, een gasmotor op productgas of microgasturbines op productgas. De systemen zijn gedimensioneerd op de gemiddelde warmtevraag

in het zomerseizoen. In alle gevallen is uitgegaan van een cv-ketel die dient voor pieklevering van warmte en als back-up bij niet beschikbaarheid van een van de andere onderdelen.

Omdat productgas uit biomassavergassing bij verbranding meer CO₂ oplevert dan verbranding van aardgas, is bij gebruik van verbrandingsgassen voor CO₂-bemesting ook een hogere productiviteit te verwachten. Dit voordeel is niet in de baten verrekend. Dat is niet van belang voor vergelijking van gasmotoren en gasturbines op productgas, omdat het effect gelijk is.

De schatting van de kosten is zoveel mogelijk gebaseerd op gegevens van leveranciers en verder op ervaring die de partners in dit project hebben opgedaan in andere projecten. Bij de baten spelen de inkomsten uit MEP subsidie een belangrijke rol. Aangenomen is, dat de huidige vergoeding van €0,097/kWh voor kleinschalige biomassaprojecten van toepassing blijft.

Resultaat marktstudie

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de investeringen voor de verschillende systemen op aardgas of productgas. Voor de vergasser en de daaraan gekoppelde systemen is uitgegaan van een geïnstalleerd vermogen van 3 MW_{th}. Deze maat past bij een bedrijfsterrein van ongeveer 4 ha. Tabel 4.2 geeft de jaarlijks terugkerende kosten en opbrengsten. De eenvoudige terugverdientijd van systemen met gasmotor of microgasturbines volgt uit delen van de meerinvestering door de jaarlijkse besparing. Het resultaat is 4,7 jaar voor de gasmotor op productgas, 5,5 jaar voor de gasmotor op aardgas en 6,0 jaar voor de microgasturbines op productgas.

Op basis van een analyse van het tuinbouwareaal zou er in 2010 ruimte zijn voor bijna 200 biomassa vergassers van 3 MW_{th} elk, met in totaal ongeveer 1800 microgasturbines van 65 kW_e.

Tabel 4.1 Investerings per hectare voor verschillende systemen.

investeringen per hectare	CV	gasmotor		microgasturbines
	aardgas	aardgas	productgas	productgas
CV	92000	92000	92000	92000
wkk	0	138000	153000	243000
vergasser	0	0	410000	409000
rookgasreiniger	0	38000	38000	0
productgasreiniger	0	0	437000	436000
gebouw en infra	75000	150000	300000	300000
totaal	167000	418000	1430000	1480000
meerinvestering tov CV		251000	1263000	1313000

Tabel 4.2 Kosten en opbrengst per hectare per jaar voor verschillende systemen.

kosten en opbrengst per hectare per jaar	CV	gasmotor		microgasturbines
	aardgas	aardgas	productgas	productgas
aardgas inkoop	121100	160900	8600	8600
houtinkoop	0	0	66700	66600
onderhoud	4100	15900	65500	65200
E-levering	0	-97000	-115000	-94000
MEP	0	0	-169500	-139400
Kosten of opbrengst	125200	79800	-143700	-93000
besparing tov CV	0	45400	268900	218200

Kanttekeningen

De MEP subsidie levert een grote bijdrage aan de rentabiliteit van de beschouwde installaties. Onzekerheid over het voortbestaan van de MEP subsidie en over de hoogte van het tarief is een factor die realisatie van het marktpotentieel nadelig beïnvloedt. De staat van ontwikkeling van indirecte vergassers en van de bijbehorende productgasreiniging maken realisatie van het marktpotentieel binnen 5 jaar ook technisch moeilijk haalbaar.

5. Conclusies

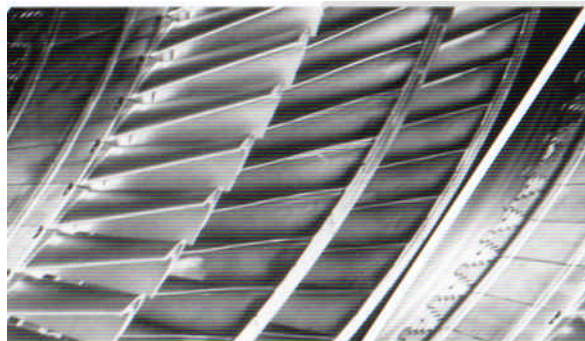
- De Capstone microgasturbine is stabiel te bedienen op menggas (productgas plus aardgas) met een verbrandingswaarde van 8 MJ/Nm^3 of meer. Bij bedrijf op puur productgas met een verbrandingswaarde van ongeveer 6 MJ/Nm^3 laat de stabiliteit van de verbranding te wensen over.
- Bij bedrijf op menggas is het elektrisch rendement van de microgasturbine praktisch gelijk aan dat op aardgas. Als het elektriciteitsverbruik van de gascompressor in rekening wordt gebracht, zal het systeemrendement iets dalen, omdat de compressor meer gas op druk moet brengen. Tijdens de uitgevoerde tests is het verbruik van de compressor niet bepaald.
- Bij bedrijf op menggas neemt het maximum vermogen van de microgasturbine hooguit met een paar procent af, zolang de verbrandingswaarde tenminste 50% is van die van aardgas. Voor menggas met lagere verbrandingswaarde wordt het vermogen begrensd door het maximum debiet aan brandstof dat de huidige configuratie toelaat.
- Boven 20 kW_e zijn de emissies extreem laag, zowel op aardgas als op menggas. Bij lager vermogen schakelt het systeem over op een andere verbrandingsmode, die iets hogere emissies oplevert. Gebruik van menggas levert dan ten opzichte van aardgas een duidelijke toename van de CO -emissie en een afname van de NO -emissie.
- Bij maximum vermogen neemt het CO_2 -gehalte in de verbrandingsgassen toe van 1,6% bij bedrijf op aardgas tot 2,1% bij bedrijf op menggas (waarin productgas 25% van de energie levert). Als de microgasturbine kan worden aangepast om het maximum vermogen ook te halen op menggas met een verbrandingswaarde van 8 MJ/Nm^3 , kan het CO_2 -gehalte verdubbelen ten opzichte van bedrijf op aardgas.
- Voor productgas uit een ander type vergasser zullen de resultaten iets anders zijn. Bij indirecte vergassers heeft droog productgas een verbrandingswaarde van 13 MJ/Nm^3 (in Güssing) tot 17 MJ/Nm^3 (Battelle of ECN Milena concept). In dat geval zou de microgasturbine zonder of met kleine aanpassingen hetzelfde vermogen kunnen leveren als op aardgas. Het CO_2 -gehalte in de verbrandingsgassen komt dan uit op 2,7%.
- Bij inspectie achteraf van de microgasturbine is geen schade maar wel lichte vervuiling bij de brander geconstateerd. Bij eventueel vervolg zal daar aandacht aan moeten worden besteed. Als de kleine hoeveelheid H_2S in het productgas de oorzaak is, zou het gebruik van de voor "zuur gas" aangepaste versie van de Capstone microgasturbine een simpele oplossing bieden.
- Uit de marktstudie volgt, dat de tuinbouwsector de beste marktperspectieven biedt voor systemen op basis van een biomassa vergasser en microgasturbines of gasmotoren.
- De eenvoudige terugverdientijd van de extra investering voor systemen met een biomassa vergasser en microgasturbines ten opzichte van een standaard cv-systeem is berekend op 6 jaar. Systemen met een gasmotor hebben een terugverdientijd van ongeveer 5 jaar.
- Uit een analyse van de tuinbouwsector volgt, dat er potentieel een markt is voor bijna 200 systemen op basis van 3 MW_{th} vergassers met ongeveer 1800 microgasturbines. Onzekerheid over de MEP subsidie en de stand van de technische ontwikkeling maken het moeilijk dit potentieel binnen 5 jaar te realiseren.

Referenties

- Boerrigter 2004 H. Boerrigter, A. van der Drift, C.M. van der Meijden, S.V.B. van Paasen, J.R. Pels, L.P.L.M. Rabou en F. Verhoeff: *Integrated biomass gasification and gas cleaning facility; ECN pilot-plant for biomass research*. Rapport ECN-RX--04-039, bijdrage aan de 2^e World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, 2004.
- Rabou 2001 L.P.L.M. Rabou en D. Jansen: *De-centralised power production using low-calorific value gas from renewable energy resources in gas turbines*. Rapport ECN-C--01-056.

Toepassing van laagcalorisch stookgas in een minigasturbine

Marktonderzoek



30 JUNI 2006

Auteurs : Ir. Jan Grift, *Cogen Projects bv*
Ir. Rinse Conradie, *Host*

Projectpartners : ECN, Pon Power
Opdrachtgever : SenterNovem

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	3
2.	Doelstelling	4
3.	Systeem	5
3.1	Beschrijving & kentallen	5
3.1.1	Eigenschappen bij aardgas als brandstof	5
3.1.2	Eigenschappen bij stookgas als brandstof	6
3.2	Marktsegmenten	7
3.2.1	Kansrijke sectoren	7
3.2.2	Utiliteitssector	9
3.2.3	Tuinbouwsector	10
3.3	Economie & haalbaarheid	11
3.3.1	Karakteristieken tuinbouw	11
3.3.2	Vergelijking minigasturbines met concurrerende systemen	12
3.3.3	Rookgasreiniging	13
3.3.4	Investerings- en onderhoud case glastuinbouw	14
3.3.5	Rentabiliteit case glastuinbouw	18
4.	Marktpotentieel	19
5.	Aanbevelingen	20

1. Inleiding

Een minigasturbine is een alternatief voor een kleine gasmotor. Prijs en prestaties zijn vergelijkbaar. Een minigasturbine vergt minder onderhoud en stoot minder CO, NO_x en onverbrande koolwaterstoffen uit. Dat is bijvoorbeeld gunstig voor toepassing in de tuinbouw waarbij de verbrandingsgassen worden benut voor CO₂-bemesting. De lage emissie van onverbrande koolwaterstoffen draagt sterk bij aan het verminderen van de totale uitstoot aan broeikasgassen. Het relatief lage vermogen van een minigasturbine biedt de mogelijkheid meerdere minigasturbine te koppelen aan één centrale vergasser. Dat maakt het bijvoorbeeld mogelijk om stookgas in plaats van warmte te transporteren naar verschillende locaties waar warmtebehoefte is. Dat verruimt de toepassingsmogelijkheden omdat de kosten van gasdistributie lager zijn dan die van warmtedistributie.

De mate, waarin een economisch voordeel te behalen is door inzet van minigasturbines, is op dit moment lastig in te schatten omdat de kosten van met name de vergassers nog onbekend zijn. Minigasturbines zijn pas kort in de markt, maar de verwachting is dat ze bij bedrijf op aardgas economisch aantrekkelijker kunnen worden dan gasmotoren. De verwachting bij aanvang van dit project was dat voor toepassing in de tuinbouw de kosten, die gemoeid zijn met het geschikt maken van de verbrandingsgassen voor CO₂-bemesting, bij minigasturbines lager uitvallen.

2. Doelstelling

De doelstelling⁹ van het project “Toepassing van laagcalorisch stookgas in een (mini) gasturbine” is als volgt gedefinieerd:

Vaststellen van de prestaties en toepassingsmogelijkheden van een mini gasturbine bij bedrijf op laagcalorisch stookgas uit vergassing van biomassa. Het project omvat:

1. Een test met een complete installatie van biomassa vergasser, stookgasreiniging, compressor en mini gasturbine.
2. Een studie naar de Nederlandse markt voor dit soort installaties.

Tijdens de test zal het stookgas worden verrijkt met aardgas om te kunnen voldoen aan de minimale verbrandingswaarde die de fabrikant als specificatie opgeeft. De test heeft als doel om:

1. de prestaties van de mini gasturbine en de kwaliteit van de uitlaatgassen vast te stellen in en buiten het door de fabrikant opgegeven werkingsgebied.
2. ervaring op te doen met de combinatie van biomassa vergasser, gasreiniging en toepassing in een mini gasturbine en dient als voorstudie voor een systeem met een speciaal voor laagcalorisch gas ontworpen mini gasturbine die momenteel bij de fabrikant in ontwikkeling is.

Deze marktstudie heeft tot doel duidelijk te maken hoe groot de totale markt is voor deze biomassa systemen.

Eerder zijn door Cogen Projects BV al studies verricht naar de markt voor biomassa vergassers in combinatie met gasmotoren en naar de markt voor mini gasturbines op aardgas. De huidige studie onderzoekt of er een markt is waar de combinatie van vergasser en mini gasturbine een betere oplossing vormt dan de bestaande, of dat er zelfs een nieuwe markt is waar vooralsnog geen andere oplossingen bestaan.

Na een beschrijving van de specifieke eigenschappen volgt een marktbeschrijving. Daarna volgt een beschouwing van de economische haalbaarheid.

⁹ Zoals verwoord in het projectvoorstel: Cogen Projects voert met assistentie van HoSt een marktstudie uit waarvoor ook Geveke en ECN een deel van de informatie leveren. Bij deze marktstudie zal nadrukkelijk het groene karakter van de geproduceerde elektriciteit worden meegewogen. De marktstudie omvat het volgende:
In kaart brengen van kengetallen voor de warmte- en elektriciteitsvraag, bedrijfstijd, kosten voor investering, biomassa, bedrijf en onderhoud, energetisch rendement en opbrengst aan warmte en elektriciteit.
Inventarisatie van energieverbruikers met een verbruik van ongeveer 0,5 MW_e tot 3 MW_e met opdeling in marktsegmenten.
In kaart brengen van specifieke voor- en nadelen van de micro gasturbine ten opzichte van huidige oplossingen in de aangegeven marktsegmenten, andere warmte-kracht technologieën zoals de gasmotor en andere nieuwe ontwikkelingen als de Stirlingmotor en brandstofcellen.
Inschatting van het technisch potentieel in de aangegeven marktsegmenten, de mogelijke energiebesparing en productie van groene elektriciteit.

3. Systeem

3.1 Beschrijving & kentallen

Om de marktniches voor minigasturbines vast te stellen moeten de eigenschappen daar van vergeleken worden met die van (de concurrerende) mini-gasmotoren, zoals die van Powertherm. Voor de vergelijking is een gasturbine genomen van een vergelijkbaar vermogen, eveneens gevoed met aardgas op lage druk. In het volgende worden eerst de eigenschappen met aardgas als brandstof weergegeven, waarna de vergelijking voor stookgas volgt (met grotere vermogens).

3.1.1 Eigenschappen bij aardgas als brandstof

			C30	Powertherm
	vermogen	kWe	28	20
	rendement	eff el	25%	31%
	aardgasgebruik	m ³ /h	12,7	7,3
rookgas	dauwpunt	oC	26	47
	temperatuur	oC	275	400
	zuurstof	%vol	18%	9%
	CO ₂	%vol	1,2%	5,4%

Specificaties van een mini gasturbine en een mini gasmotor werkend op aardgas

Vanwege het streven naar een laag NO_x gehalte zal de luchtverhouding (ten opzichte van stoichiometrische verbranding) bij minigasturbines die gestookt zijn op aardgas in de orde van een factor 8 à 9 zijn. Dit betekent dat de temperatuur van het rookgas relatief laag is (275-305 °C) en het zuurstofgehalte relatief hoog (18%). Het dauwpunt ligt ook relatief laag ten opzichte van gasmotoren (ca 26 t.o.v. 47 °C), evenals het CO₂-percentage (1,2 t.o.v. 5,4%).

De latente warmte¹⁰ in de rookgassen van minigasturbines zal vanwege het lage dauwpunt niet worden benut. Dit geldt ook als een kanaalbrander/afgassenketel wordt nageschakeld om het rookgas op een hogere temperatuur te brengen.

Bij mini gasturbines vindt geen benutting van motorwarmte plaats. Alle restwarmte komt in de rookgassen ter beschikking. Om een goed overall rendement te krijgen moet daarom gezocht worden naar toepassingen met een lage gebruikstemperatuur of in combinatie met een afgasketel.

¹⁰ De latente warmte is de warmte die vrij komt bij de condensatie van rookgassen na afkoeling tot 25 °C

3.1.2 Eigenschappen bij stookgas als brandstof

Vanuit de metingen van ECN is bekend wat de brandstof- en rookgassamenstelling van laagcalorisch stookgas is. Om van het volledige vermogen gebruik te kunnen maken adviseert ECN om naar een stookgas met een hogere stookwaarde te gaan van om en nabij 15 MJ per m³. Middels een indirecte vergasser kan deze gewenste gaskwaliteit worden bereikt ten opzichte van de, bij de testen gebruikte, circulerend wervelbedvergasser. Van de indirecte vergasser zijn meerdere varianten mogelijk: het Battelle concept, de FICFB zoals in Güssing staat, en het door ECN ontwikkelde Milena concept. Dit betekent dat voor die situatie het CO₂ gehalte in de rookgassen afgeschat moet worden om een uitspraak te doen over het effect voor de bemesting.

Uit een bewerking van de analyseresultaten blijkt dat de stookwaarde op basis van het volume aan brandbare bestanddelen ca 20 MJ/m³ is. Per m³ brandbare bestanddelen is ca 0,9 m³ aan zuurstof nodig en komt ca 0,9 m³ aan CO₂ en ca 0,6 m³ aan waterdamp vrij. Vanuit deze gegevens kan een balans worden opgesteld van een turbine met laagcalorisch gas van 15 MJ/m³.

Bij het gebruik van stookgas wordt er zoveel verbrandingslucht toegevoerd dat het gehalte aan zuurstof in de uitlaat minimaal 18% is. Dit komt overeen met een luchtverhouding van 9! Uitgaande van een gelijke samenstelling van de brandbare componenten in een stookgas met een hogere calorische waarde en een kleiner aandeel CO₂ in het stookgas (indirecte vergassing) komt het CO₂ gehalte in de rookgassen op 2,2% uit. Dit is circa een kwart van een gasmotor op hetzelfde stookgas (CO₂ gehalte 8,7%) met een luchtfactor van ruim 2.

Het dampgehalte van rookgassen van een met stookgas gevoede minigasturbine is ruim 2%, hetgeen overeenkomt met een dauwpunt van rond de 22 °C. De volumestroom aan rookgassen per unit van 65 kWe is 1.752 nm³/h met een temperatuur van 270 °C. Bij afkoeling tot 55 °C ten behoeve van bijvoorbeeld een kasverwarmingssysteem levert dit 136 kW op (thermisch rendement van ca. 59%). Het totale systeemrendement van een minigasturbine is door de hoge luchtvermaat lager dan dat van gasmotoren (87 % ten opzichte van 93% op onderwaarde).

rookgastemperatuur	270 oC
dampdruk	2,6 kPa
vochtgehalte	16,2 g/kg
dauwpunt	21,9 oC
massastroom	2.265 kg/h
CO ₂	2,2%
afkoeling tot	55 oC
therm vermogen	136 kWth
therm rendement	58,7%

Eigenschappen rookgas van een 65 kWe minigasturbine met stookgas van 15 MJ/m³

3.2 Marktsegmenten

3.2.1 Kansrijke sectoren

De inzet zal vooral op die plaatsen mogelijk zijn waar de warmte (en eventueel de CO₂) in de relatief schone rookgassen benut kunnen worden gedurende een groot aantal uren in het jaar bij een laag temperatuurniveau. Het lage NO_x gehalte biedt voordelen in met name de voedingsmiddelenindustrie (minder kans op vorming nitrosaminen). De toepassingsmogelijkheden zijn:

- Aanmaak van warm tapwater;
- Ruimteverwarming bij sectoren met een lang stookseizoen, eventueel aangevuld met een absorptiekoelmachine (akm) om het stookseizoen te verlengen;
- Zwembadwater (binnenbad)
- Procesbaden zoals voor het beitsen van producten;
- Ovens en drogers, bijvoorbeeld als voorverwarming van verversingslucht;
- CO₂ bemesting in de tuinbouw;
- Met een afgasketel als nageschakelde techniek om het temperatuurniveau op te peppen, bijvoorbeeld voor de aanmaak van stoom.

Uit een analyse van het warmteverbruik zijn de volgende sectoren in overweging genomen:

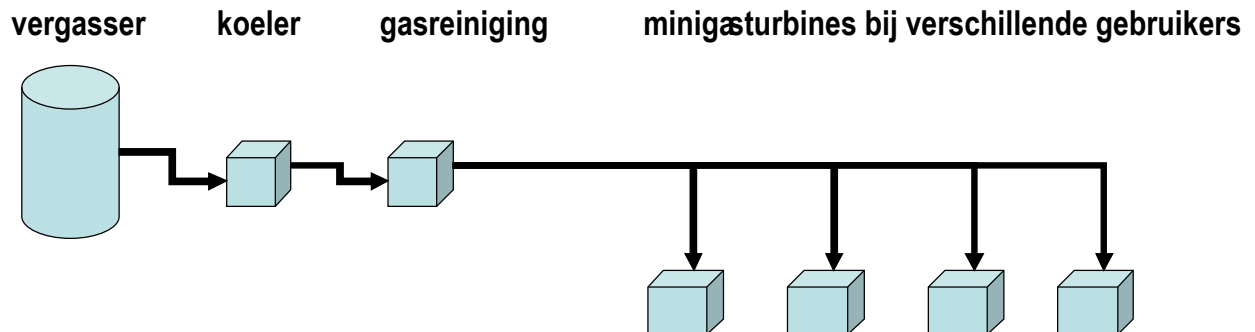
toepassing \ sectoren		gezondheidszorg	universiteiten	kantoren	sportaccommodaties	glastuinbouw	oppervlaktebeh industrie	landbouw verw.	levensmiddelen	papierindustrie	bouwstoffen	textielindustrie	lederindustrie	zeepindustrie	chemische industrie
1	warm tapwater	x	x		x										
2	ruimteverwarming	x	x	x		x									
3	akm - koude	x	x	x			x								
4	zwembadwater				x										
5	procesbaden					x									
6	ovens en drogers					x	x	x	x	x	x	x	x	x	
7	CO ₂ bemesting					x									
8	afgasketel-stoom	x	x					x	x		x			x	

Geïdentificeerde sectoren met een vrijwel continu warmte/koudegebruik

In overweging nemende dat:

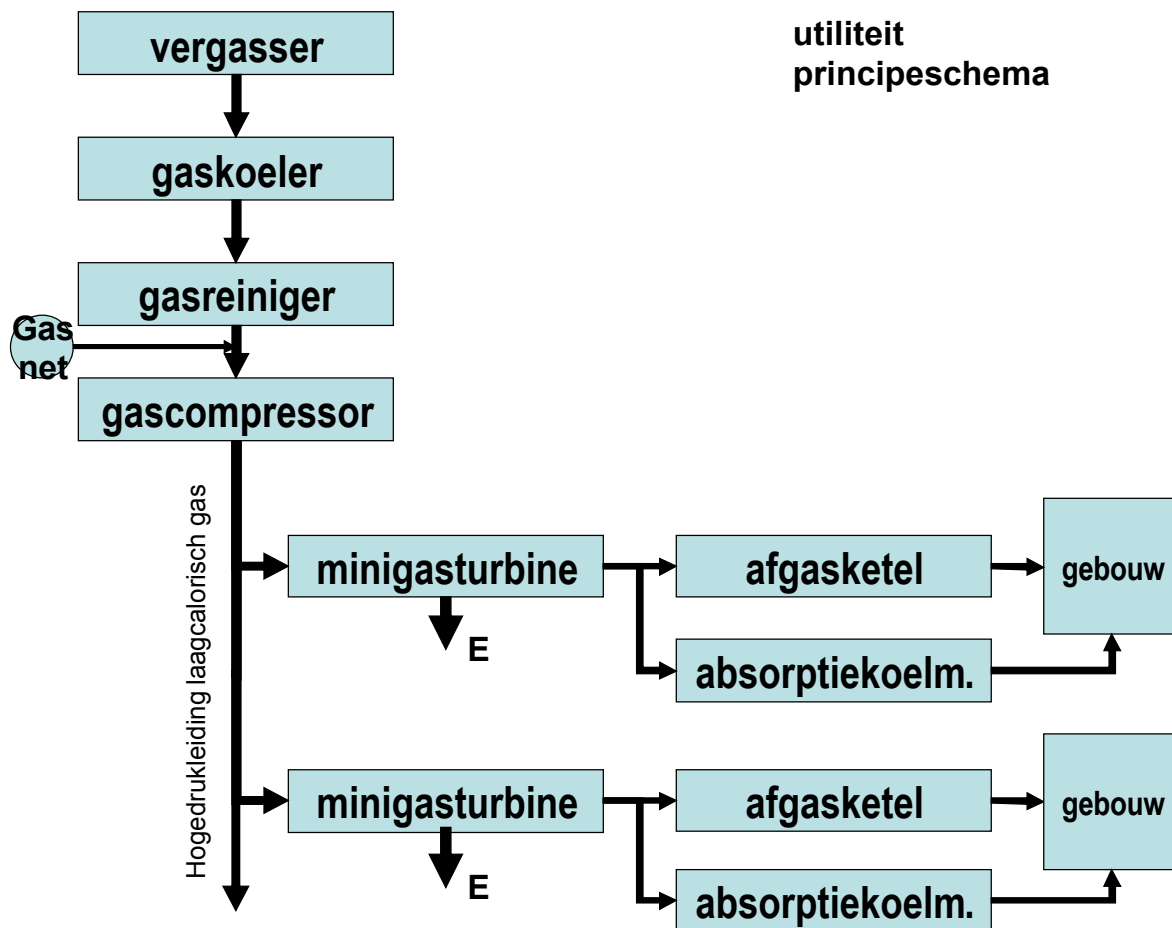
- een seriematige opstelling (cascade) van een groot aantal minigasturbines technisch en financieel niet kan concurreren met een enkele grote gasturbine (zoals OPRA);
- een vergassingsunit minimaal 3,0 MWth moet zijn om economisch te kunnen opereren;

moeten er toepassingen gevonden worden waarbij centraal laagcalorisch gas wordt aangemaakt dat via een hogedrukleiding over een terrein wordt verspreid naar decentrale gebruikers van warmte en/of koude.



Aangezien er niet veel (nieuwe) bedrijventerreinen zijn met een concentratie bedrijven met ieder een continu warmteverbruik van relatief lage temperatuur en klein vermogen, blijven dan alleen de utiliteits- en de tuinbouwsector over.

3.2.2 Utiliteitssector

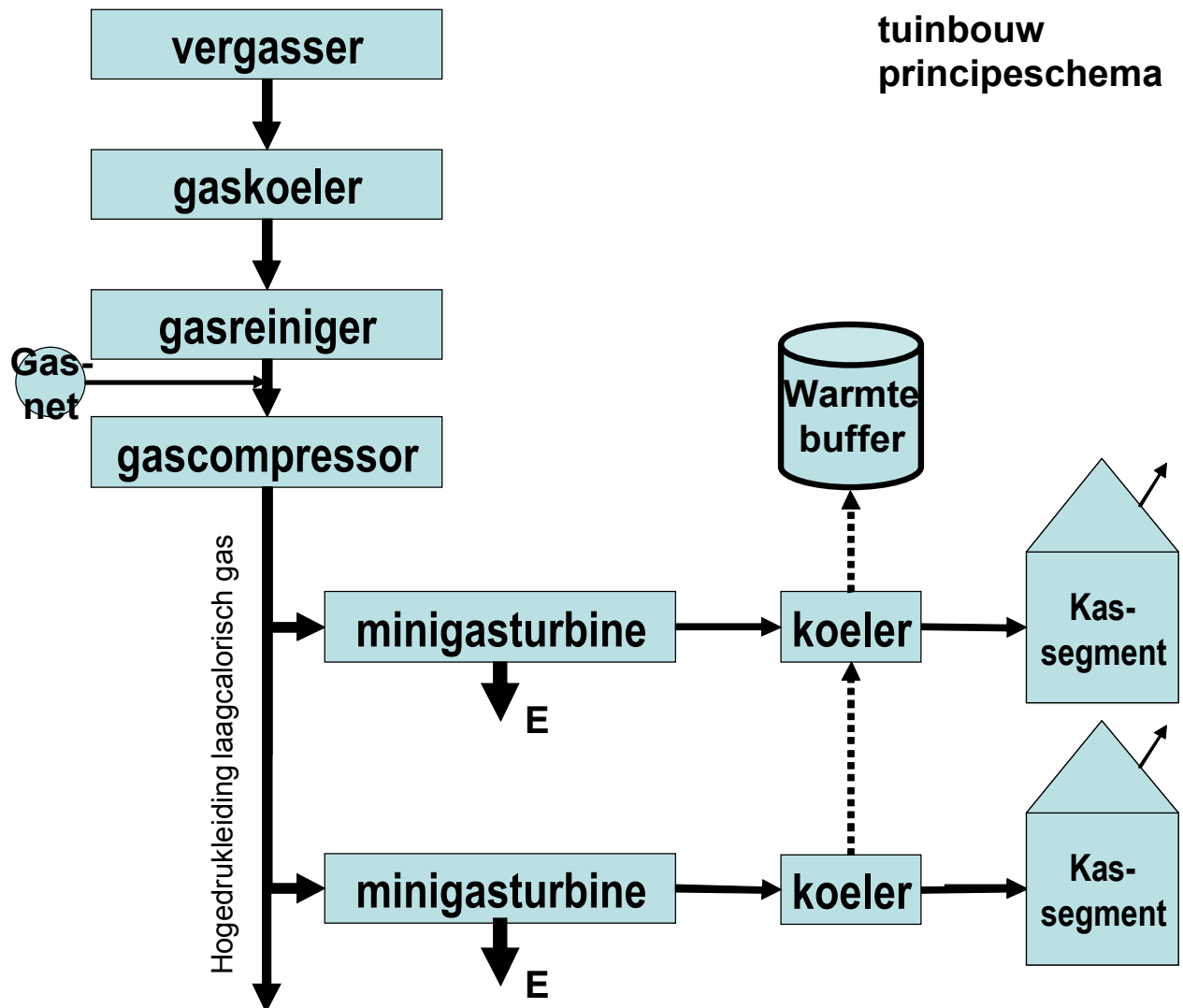


Systeemopzet bij een zorginstelling, universiteit of kantorenpark

De bovenstaande systeemopzet geeft een situatie aan van een centrale vergasser en decentraal opgestelde gasturbines, die hun warmte afgeven aan een gebouw of aan een absorptiekoelmachine. Het aardgasnet dient als back-up voor uitval van de vergasser en/of piekbelastingen.

Bij de utiliteitssector (terreinen met gebouwen zoals een kantorenpark, medische centra, universiteitsterreinen) moet de kanttekening worden geplaatst dat dit de meeste gevallen onhaalbaar zal blijken uit het oogpunt van het bestemmingplan cq de milieuhinder. De verwachting is dat de plaatsing van een vergassinginstallatie in bebouwde omgeving op grote bezwaren zal stuiten. Daarnaast hebben bestaande terreinen van universiteiten en medische centra al een uitgebreid warmte en soms koudenet. De aanleg van een gasnet waarbij decentraal warmte en/of koude wordt geproduceerd, zal economisch niet haalbaar zijn, waardoor alleen nieuwe terreinen in aanmerking komen. Voor de utiliteit spreken we dus praktisch gezien over bedrijfsparken met kantoren die volledig nieuw opgezet worden waarbij in het bestemmingsplan rekening wordt gehouden met de plaatsing van een vergasser. Een nabijgelegen industrieterrein van een zwaardere categorie zou daarbij een pre zijn. Deze situatie zal niet veel voor komen en is daarom niet verder uitgewerkt.

3.2.3 Tuinbouwsector



Systeemopzet bij een tuinbouwgebied

In bovenstaand schema is een situatie weergegeven met een centrale vergasser en decentraal opgestelde minigasturbines die in de tuinbouwkassen staan en hun rookgassen overdag in de zomer daar afgeven. Het rookgas zal gekoeld moeten worden om te voorkomen dat de kas oververhit raakt. De warmte kan in een buffervat worden opgeslagen en 's nachts aan de kas worden toegevoerd. De elektriciteit kan aan het landelijke net worden geleverd.

Wat betreft de tuinbouwsector zijn er wel kansen gezien de vele verplaatsingen en concentraties die er plaatsvinden.

3.3 Economie & haalbaarheid

3.3.1 Karakteristieken tuinbouw

Traditionele kassen voor warme groenteteelt vragen circa 12 kWh/m² aan elektriciteit¹¹. Het piekvermogen aan elektriciteit is maximaal 130 W/m² bij belichtende tuinders (15.000 lux). Dit vermogen is zodanig groot dat minigasturbines voor dit marktsegment zeker niet interessant zullen zijn vanwege de lage kracht/warmteverhouding van deze toestellen. De gemiddelde elektriciteitsprijs is circa €0,07 / kWh exclusief energiebelasting.

Het gasverbruik is 35 tot 45 m³/m² aardgas per jaar. Bij een moderne kas is het maximale thermische vermogen 150 W/m². Het basisverbruik in de zomer is gemiddeld over een dag ca 20 W/m². De gemiddelde prijs¹² is €0,30 / m³ excl. energiebelasting.

De productie in de tuinbouw neemt door CO₂ bemesting toe. De productietoename per 100 ppm concentratiestijging is circa 11,6%¹³. De CO₂ concentratie in de buitenlucht is 's zomers rond de 360 ppm.

Een typische CO₂ bemesting bestaat uit het toevoegen van 1.000 tot 1.500 kg/ha.dag in de periode week 20-40. De bemesting vindt plaats naar rato van de beschikbaarheid van licht, circa 10 uur per dag met een piek rond 13.00 uur. De hoeveelheid CO₂ bemesting is begrensd door het nuttig inzetten van warmte in het geval van CO₂-aanmaak in een CV-systeem met buffermogelijkheden (warmtegebruik tijdens de zomer in de nacht).

Het ventilatievoud gedurende CO₂ injectie is ca 25¹⁴. Er is een trend om deze omlaag te brengen richting een gesloten kas concept door kaskoeling toe te passen. De absorptie van CO₂ door de planten op een zonnige dag bedraagt circa 700 kg/ha.

De gemiddelde prijs voor ingekochte CO₂ is circa €0,10 / kg.

¹¹ Kas als energiebron

¹² Forward 2007 inclusief transport

¹³ PBG 1999; geldig in gebied van 360-460 ppm

¹⁴ Berekend op basis van een eenvoudige warmtebalans

3.3.2 Vergelijking minigasturbines met concurrerende systemen

Op basis van een voorbeeldsituatie is berekend wat de opbrengst is van een systeem in de tuinbouw met minigasturbines of een gasmotor op basis van een laagcalorisch gas ten opzichte van een verwarmings- en CO₂- bemestingssysteem op basis van een CV ketel en die van een reguliere gasmotor. Daarbij is steeds uit gegaan van een dimensionering van het systeem op een thermisch vermogen van 480 kW. Dit is de basislast per hectare in de zomer, wanneer gedurende 10 uur per dag bemest wordt en de warmte via een buffer 's nachts wordt ingezet.

opbrengstvergelijking op jaarbasis		CV	gasmotor		mini GT's
per hectare		aardgas	aardgas	stookgas	stookgas
aardgas inkoop		€ 121.100	€ 160.900	€ 8.600	€ 8.600
houtinkoop				€ 66.700	€ 66.600
onderhoud		€ 4.100	€ 15.900	€ 65.500	€ 65.200
teruglevering		€ -	€ 97.000-	€ 115.000-	€ 94.000-
MEP				€ 169.500-	€ 139.400-
jaarkosten		€ 125.200	€ 79.800	€ 143.700-	€ 93.000-
besparing tov CV		€ -	€ 45.400	€ 268.900	€ 218.200
CO ₂ productie	kg/h	106	168	272	272
CO ₂ concentratie in de kas	ppm	374	399	440	437
productiviteit		100,0%	102,7%	107,1%	106,9%

Resultaten opbrengstvergelijking van een case in de tuinbouw (1 hectare).

Door de hogere warmtekrachtverhouding leveren de minigasturbines bij een gelijke warmteopbrengst minder elektriciteit op dan een (stook-)gasmotor. De CO₂-opbrengst van stookgassystemen is een factor 2,5 hoger dan bij het gebruik van een CV als bemestings-systeem. De productiviteit zal door deze extra bemesting groter zijn.

Bij deze berekeningen is verder uitgegaan van:

- Een zodanige beluchting dat de kas niet warmer wordt dan 25 °C bij een omgevingstemperatuur van 20 °C;
- Inzet van het systeem gedurende 10 uur per dag in de zomer (160 dagen) en verder gedurende 24 h/dag ('s zomers buffering van warmte voor gebruik 's nachts);
- Geen eigen elektriciteitsgebruik (alle opgewekte elektriciteit teruggeleverd);
- Een indirecte vergassingsinstallatie die de restwarmte gebruikt voor het drogen van de houtsnippers, vergassingsrendement 75% (drogen van 50% naar 30% vocht);
- MEP-subsidie 9,7 ct/kWhe op biogas (wkk op aardgas onder de grens, geen MEP);
- Een zuurstofgehalte in de afgassen van resp 18 en 10% voor stookgasgestookte gasturbine resp. gasmotor.
- De aardgasgestookte gasmotor draait niet tijdens de daluren (rentabiliteit te laag).

3.3.3 Rookgasreiniging

Een belangrijk voordeel van minigasturbines is de relatief schone rookgassen ten opzichte van gasmotoren. Hierdoor wordt op de investering en het onderhoud van rookgasreiniging bespaard. Met het eenvoudige rekenmodel voor de ventilatie van kassen in de zomersituatie kan berekend worden of de concentratie onder de normwaarden blijven. De resultaten in onderstaande tabel geven aan dat alleen de restanten aan C_2H_4 kritisch zijn. De andere componenten zijn ruim onder de kritische grenswaarden voor chronische blootstelling.

component	berekend	grenswaarde	factor
NO	0,024	0,250	10,43
NO ₂	0,005	0,100	20,87
C ₂ H ₄	0,048	0,008	0,17

Berekende concentratie van schadelijke componenten in de kas in ppm

De grenswaarde voor acute blootstelling aan C_2H_4 is 0,05 ppm, dit is hoger dan de berekende waarde.

3.3.4 Investerings en onderhoud case glastuinbouw

De investeringen van de voorbeeldsituatie zijn bepaald voor een systeem in de tuinbouw met minigasturbines op basis van een laagcalorisch gas ten opzichte van een verwarmings- en CO₂- bemestingssysteem op basis van een CV-ketel en die van een reguliere gasmotor.

In onderstaande tabel worden de investeringen weergegeven. De verschillende posten worden vervolgens toegelicht.

investeringen		CV	gasmotor		mini GT's
per hectare		aardgas	aardgas	stookgas	stookgas
CV		€ 92.000	€ 92.000	€ 92.000	€ 92.000
wkk		€ -	€ 138.000	€ 153.000	€ 243.000
vergasser		€ -	€ -	€ 410.000	€ 409.000
rookgasreiniger		€ -	€ 38.000	€ 38.000	€ -
stookgasreiniger		€ -	€ -	€ 437.000	€ 436.000
gebouw en infra		€ 75.000	€ 150.000	€ 300.000	€ 300.000
totaal		€ 167.000	€ 418.000	€ 1.430.000	€ 1.480.000

Investerings CV

De investeringen in de cv-ketel zijn gebaseerd op prijslijsten van Viessmann. Hierbij is uitgegaan van een cv-ketel van 575 kW nominaal. De investeringen zijn inclusief de kosten voor meet- en regelsysteem en de installatie van de ketel en de benodigde componenten. Het betreft de elektrische aansluiting, de gasaansluiting van de ketel, de schoorsteen voor de ketel en het leidingwerk in het ketelhuis. Deze kosten zijn gebaseerd op een raming van een installateur voor vergelijkbaar project (€191/kWth).

Aangezien niet volledig in de warmtevoorziening wordt voorzien door de gasmotor op aard- en stookgas en de miniturbines, is een tevens voor deze situaties een cv-ketel opgenomen. De investeringen voor CV-capaciteit voor de piekbelastingen zijn buiten beschouwing gelaten (zijn voor alle cases gelijk).

Investering aardgasgestookte gasmotor

De investeringen in de aardgasgestookte gasmotor WKK-unit is gebaseerd op ervaringen van Cogen Projects met grotere systemen (> 2 MW, €450/kWe). De investeringen zijn inclusief kosten voor het schakelpaneel, de installatie en de bekabeling. De gasmotor is voorzien in een container voor buitenopstelling. Omdat de rookgassen niet geschikt zijn voor directe injectie in de kas wordt een katalytische rookgasreiniging toegepast.

Investerings stookgasgestookte gasmotor

De investeringen in de biogasgestookte gasmotor WKK-unit is gebaseerd op een offerte van MAN voor twee 340 kWe gasmotoren (€605/kWe). Grotere systemen zullen goedkoper zijn (ca €550/kWe). De investeringen zijn inclusief kosten voor het schakelpaneel, de installatie en de bekabeling. De gasmotor is voorzien in een container voor buitenopstelling. Omdat de rookgassen niet geschikt zijn voor directe injectie in de kas wordt een katalytische rookgasreiniging toegepast.

Investerings mini-gasturbine

De investeringen van de mini-gasturbines zijn gebaseerd op de opgave van Pon Power voor 65 kWe miniturbine (€1.062/kWe). De investeringen zijn inclusief netbewaking, netsynchronisatie en dergelijke.

Investerings vergasser

Gekozen is voor een indirecte vergasser. Uit de resultaten van de tests blijkt, dat de huidige minigasturbine kleine aanpassingen behoeft om vol vermogen te kunnen leveren met gas van ongeveer 15 MJ/m³. Middels een indirecte vergasser kan de gewenste gaskwaliteit worden bereikt. Van de indirecte vergasser zijn meerdere varianten mogelijk: het Battelle concept, de FICFB zoals in Güssing staat, en het door ECN ontwikkelde Milena concept. Het Battelle en het FICFB concept zijn leverbaar vanaf een vermogen van 10 MWth. Deze schaalgrootte is niet geschikt voor een toepassing voor tuinder.

Ingeschat wordt dat de investeringen in een concept als door ECN ontwikkeld vergelijkbaar zijn met de investeringen in circulerend wervelbed vergasser. Op basis van deze inschatting worden de investeringen in de vergasser geraamd op € 1.500.000 voor 3 MWth (€500/kWth).

Investerings stookgasreiniging vergasser

Om het stookgas te kunnen benutten middels een gasmotor of miniturbines, zal het stookgas gereinigd dienen te worden. De teren en andere verontreinigingen in het stookgas dienen verwijderd te worden. Voor de stookgasreiniging is gekozen voor het OLGA principe. De teren worden verwijderd middels scrubbers, waarin het gas wordt gereinigd met een speciale scrubberolie. Vervolgens wordt het gas nogmaals gereinigd middels water scrubbers waarbij het stookgas van onder andere ammoniak wordt ontdaan.

De investeringen in de stookgasreiniging zijn gebaseerd op gegevens van de leverancier van het systeem. De investeringskostenschatting is inclusief de kolommen, het leidingwerk, pompen, warmtewisselaars en isolatie (€533/kWth)

Investerings rookgasreiniging gasmotor

De investering van een katalytische rookgasreiniger voor aardgasgestookte gasmotor bedraagt voor een 2 MWe systeem circa €80.000,-, hetgeen overeenkomt met circa €80,- per kWth. Voor een stookgas gestookte gasmotor is hetzelfde bedrag aangehouden.

Investerings in de infrastructuur (+gebouw)

De investeringen in de infrastructuur en het gebouw zijn de kosten die benodigd zijn voor het elektrisch, gas- en waterzijdig als wel als het rookgaszijdig aansluiten. Voor de WKK's zijn tevens de kosten voor de trafo en het aansluiten op het openbare net inbegrepen. Per hoofdcomponent is €75.000,- per hectare aangehouden.

Onderhoudskosten

De onderhoudskosten zijn gebaseerd op de uitgangspunten weergegeven in onderstaande tabel.

onderhoud	eenheid	bedrag
CV	jaar.kWth	€ 8,50
aardgasgestookte gasmotor	kWhe	€ 0,006
stookgasgestookte gasmotor	kWhe	€ 0,007
minigasturbine 65 kWe	kWhe	€ 0,014
vergasser	jaar.kWth	€ 30,00
rookgasreiniger gasmotor	jaar.kWth	€ 10,00
stookgasreiniger vergasser	jaar.kWth	€ 30,00

De weergegeven onderhoudskosten zijn gebaseerd op opgaven van leveranciers en ervaringscijfers. Mogelijk zijn de kosten voor een rookgasreiniging van een gasmotor op stookgas fractioneel lager.

De operationele kosten van de gasreiniging, zijn op dit moment nog niet bekend. Belangrijk voor de operationele kosten is het olieverbruik. In een ideale situatie wordt er bijna géén olie verbruikt naast de initiële olie waarmee het systeem gevuld wordt. Concrete getallen zijn nog vertrouwelijk en het is te vroeg om hier een opgaaf voor te doen. Het systeem verbruikt géén water of additieven / chemicaliën. In deze studie is een zelfde bedrag als dat voor de vergasser zelf aangehouden.

Op basis van de uitgangspunten zijn de onderhoudskosten voor de voorbeeldsituaties bepaald. De resultaten worden weergegeven in onderstaande tabel.

onderhoud		CV	gasmotor		mini's
per hectare . jaar		aardgas	aardgas	stookgas	stookgas
CV		€ 4.100	€ 4.100	€ 4.100	€ 4.100
wkk		€ -	€ 7.000	€ 7.400	€ 12.100
vergasser		€ -	€ -	€ 24.600	€ 24.500
rookgasreiniging		€ -	€ 4.800	€ 4.800	€ -
stookgasreiniging		€ -	€ -	€ 24.600	€ 24.500
totaal		€ 4.100	€ 15.900	€ 65.500	€ 65.200

3.3.5 Rentabiliteit case glastuinbouw

De meerinvestering afgezet tegen de besparing ten opzichte van een situatie met een CV-ketel levert het volgende beeld op per hectare:

eenvoudige terugverdientijd in jaren		CV	gasmotor		mini GT's
		aardgas	aardgas	stookgas	stookgas
meerinvestering			€ 251.000	€ 1.263.000	€ 1.313.000
besparing			€ 45.400	€ 268.900	€ 218.200
eenvoudige terugverdientijd			5,5	4,7	6,0

De eenvoudige terugverdientijd van stookgassystemen is rond de 5 a 6 jaar.

Een globale indicatie van de kosten, baten en opbrengsten wordt in onderstaande tabel aangegeven. Daarbij is uitgegaan van afschrijving in 10 jaar, restwaarde €0 en 6% rente.

exploitatievergelijking per hectare		CV	gasmotor		mini GT's
		aardgas	aardgas	stookgas	stookgas
afschrijving&rente		€ 22.700	€ 56.800	€ 194.300	€ 201.100
aardgas inkoop		€ 121.100	€ 160.900	€ 8.600	€ 8.600
houtinkoop		€ 0	€ 0	€ 66.700	€ 66.600
teruglevering		€ 0	€ 97.000-	€ 115.000-	€ 94.000-
MEP		€ 0	€ 0	€ 169.500-	€ 139.400-
		€ 143.800	€ 120.700	€ 14.900-	€ 42.900
besparing tov CV			€ 23.100	€ 158.700	€ 100.900

4. Marktpotentieel

Minigasturbines kunnen als decentrale CO₂ injectie/verwarmingssystemen worden ingezet in de glastuinbouw en als verwarmings/koelsystemen in een kantorenpark of instituut. In het laatste geval zal de plaatsing van een centrale grote vergasser moeilijk inpasbaar zijn. Blijft over de glastuinbouw als enige serieuze mogelijkheid.

In de glastuinbouw is de eenvoudige terugverdientijd van minigasturbines en gasmotoren op stookgas in dezelfde orde van grootte (5-6 jaar).

Aangezien vergassers vanaf 3 MW (2250 kW stookgas) gebouwd worden moet het tuinbouwgebied minimaal 4 hectare groot zijn. In een dergelijk gebied worden dan circa 10 minigasturbines verspreid over het terrein geplaatst, gevoed door een laagcalorisch-gasleiding.

Het tuinbouwareaal in Nederland is momenteel ca 10.500 ha groot. In 2010 zal circa 4.000 hectare hiervan bestaan uit belichtende tuinders. Het restant bestaat voor een groot deel uit tuinders met intensieve teelten die (inmiddels) een gasmotor hebben geplaatst. Stel dat het overblijvend potentieel 40% is dan zou er met een penetratiegraad van 20% circa 520 hectare in aanmerking komen (circa 1800 stuks mini gasturbines a 65 kWe).

markt			
totaal areaal	ha		10.500
niet belichtend	ha	62%	6.500
nog geen gasmotor/nieuw	ha	40%	2.600
penetratie	ha	20%	520
opgesteld thermisch vermogen	kW	480	249.600
aantal eenheden a 65 kWe		136	1.832
opgesteld elektrisch vermogen	kW	65	119.083
stookgasvraag		232	425.296
aantal vergassers a 3 MWth	kW	2.250	189

Grote onzekerheid in het marktpotentieel is het voortbestaan van de MEP en de technisch/economische beschikbaarheid van de indirecte vergasser met stookgasreiniging.

5. Aanbevelingen

Op basis van de volgende analyse is een aantal onzekerheden te destilleren die gezien de kansen die er liggen nader onderzocht moeten worden:

1. De concentratie C_2H_4 zal beter bepaald moeten worden omdat deze mogelijk kritisch is. Hiervoor zullen de emissies met een echt stookgas bepaald moeten worden en het eenvoudige rekenmodel voor de balans in de kas verbeterd. Een pilot geeft een nog beter beeld van de risico's op dit gebied.

De ontwikkeling van indirecte vergassers en de ontwikkeling van de prijs van biomassa brandstof (hout) in combinatie met de MEP zullen op de voet gevolgd moeten worden. Hier liggen mogelijkheden voor de tuinbouw om de stijgende energieprijzen het hoofd te bieden.